

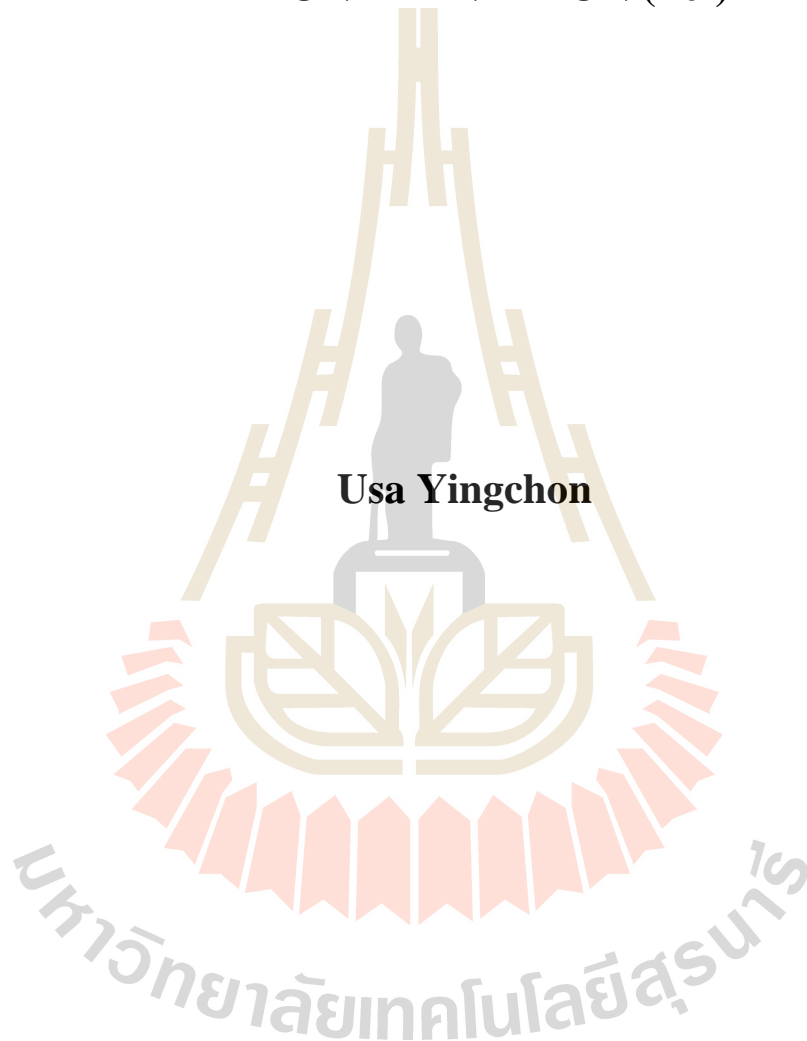
การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันลำปะหลังที่ผ่านการ
บำบัดขั้นต้นโดยใช้เหล็กประจุศูนย์



นางสาวอุษา ยิ่งชล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**THE INCREASE IN EFFICIENCY OF BIOGAS
PRODUCTION FROM TREATED CASSAVA PULP BY
ZERO VALENT IRON (Fe⁰)**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยใช้
เหล็กประจุศูนย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.นิตยา บุญเทียน)

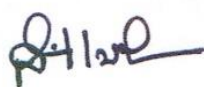
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.สุรียลักษณ์ รอดทอง)


กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อุษา ยิงชล : การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัด
ขั้นต้นโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ (THE INCREASE IN EFFICIENCY OF BIOGAS
PRODUCTION FROM TREATED CASSAVA PULP BY ZERO VALENT IRON (Fe^0))
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตยา บุญเทียน, 358 หน้า.

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยความร้อนและสภาวะที่เป็นกรด - ด่าง แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่อมีการให้ความร้อนและเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด - ด่าง ในการบำบัดขั้นต้น ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้เหล็กประจุศูนย์ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS ขั้นที่ 2 ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ และขั้นที่ 3 ศึกษาเวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ด้วยการทดลองแบบกะ (Batch Test) ขนาด 6 L เวลา 60 วัน การะบรทุกสารอินทรีย์ 3.15 kg TVS/m³-day ผลจากการทดลองในส่วนที่ 1 พบว่า เมื่อมีการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที ที่ pH 10 มีปริมาณไบโอแก๊สมากที่สุด 2.12 m³/kg TVS คิดเป็น 2.79 เท่าของสภาวะควบคุมที่มีปริมาณไบโอแก๊ส 0.76 m³/kg TVS ผลจากการทดลองส่วนที่ 2 ในขั้นที่ 1 พบว่า เมื่อมีการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS ที่ pH 10 มีปริมาณไบโอแก๊สมากที่สุด 4.91 m³/kg TVS คิดเป็น 6.38 เท่าของสภาวะควบคุม เพราะเหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe^{3+}) 74.34% ซึ่งมากกว่าทุกๆสภาวะ ในขั้นที่ 2 พบว่าเมื่อมีการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที ที่ pH 10 โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS มีปริมาณไบโอแก๊สมากที่สุด 7.53 m³/kg TVS คิดเป็น 9.41 เท่าของสภาวะควบคุม เพราะเหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe^{3+}) 74.37% ซึ่งมากกว่าทุกๆสภาวะ และในขั้นที่ 3 พบว่าเมื่อมีการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100 °C pH 10 โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส 30, 35 และ 40 นาที มีปริมาณไบโอแก๊สเกิดขึ้นสูงที่สุด ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 โดยเหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe^{3+}) 74.42 - 89.73% สรุปได้ว่า การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100 °C pH 10 เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอแก๊สมากที่สุด มีปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นสูงกว่าสภาวะควบคุม 9.41 เท่า และสูงกว่าสภาวะที่ไม่มีการเติมเหล็กประจุศูนย์ 3.55 เท่า

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา อุษา ยิงชล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา นิตยา บุญเทียน

USA YINGCHON : THE INCREASE IN EFFICIENCY OF BIOGAS
PRODUCTION FROM TREATED CASSAVA PULP BY ZERO VALENT
IRON (Fe^0). THESIS ADVISOR : ASST. PROF. NITTAYA BOONTIAN,
Ph.D., 358 PP.

ZERO VALENT IRON / ACID - BASE PRETREATMENT / HYDROLYSIS /
BIOGAS PRODUCTION / CASSAVA PULP

The optimum conditions for the production of biogas from waste cassava pulp using zero valent iron (ZVI) after hydrolysis with temperature and acid - base has been investigated. The experiment had two parts. Part 1 was the study of the optimum conditions for biogas production after hydrolysis with temperature and acid - base. Part 2 was the study of the optimum conditions for the production of biogas using ZVI. the latter part is divided into three step. The first step was a study of the optimum conditions for biogas production using 100 g/kg TVS. The second step was a study of the amount of iron ions to achieve a suitable biogas. The last step was a study of appropriate reaction time for biogas generation. The results of 60 days batch test unit and Organic Loading Rate (OLR) was 3.15 kg TVS/ m^3 -day. The result of the experiment part 1 shows temperature 100 °C with 30 minutes reaction time and pH 10 on the pretreatment showed the highest effect of biogas production rate (2.12 m^3 /kg TVS). It was 2.79 times higher than control condition (0.76 m^3 /kg TVS). The first step of experiment part 2 revealed the hydrolysis conditions of cassava pulp at pH 10 with temperature 100 °C and 30 minutes of the reaction time using ZVI was 100 g/kg TVS. The highest biogas production rate of that condition was 4.91 m^3 /kg TVS and it was 6.38 times higher than

control condition with Iron oxide 74.34% in Goethite (FeOOH , Fe^{3+}) form. The result of the second part of experiment part 2 found that after the hydrolysis rate of cassava pulp at pH 10 with temperature 100°C and 30 minutes the reaction time using ZVI was 60 g/kg TVS. ZVI arose the efficiency of biogas production higher than without the ZVI by 9.41. It resulted 74.37% Iron oxide was in Goethite (FeOOH , Fe^{3+}) condition. The result of third part of experiment part 2 showed that the hydrolysis conditions of cassava pulp at pH 10 with temperature 100°C using zero valent iron 60 g/kg TVS and the reaction time 30, 35 and 40 minute obtained a maximum biogas production. There is no significant difference among treatments in alpha 0.05. It was also found that 74.42 - 89.73% of Iron oxide was produced in Goethite (FeOOH , Fe^{3+}) condition. In conclusion, hydrolysis conditions of cassava pulp was enhanced with pH 10, 100°C and 30 minutes reaction time using ZVI to be 60 g / kg TVS. The highest biogas production rate was 9.41 times higher than the control and that condition was using 3.55 times ZVI.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Usa Yingchon

Advisor's Signature Nilaya Pongdorn

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตยา บุญเทียน ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำปรึกษา แนวทางแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจ กำลังกายแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งยังให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรเนตรวงศ์ หัวหน้าสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ประธานสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริลักษณ์ รอดทอง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้คำแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหา และข้อเสนอแนะที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดจิต ครุจิต ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ เกี่ยวกับการทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลแต่ละชุดการทดลอง ด้วยการทดสอบทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS รวมทั้งให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยอบรมสั่งสอนทั้งด้าน วิชาการ ด้านจริยธรรม ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG), ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ทุนการทำวิจัย ในมูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและ สมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี, ทุนพัฒนาศักยภาพบุคลากร STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics), ทุนการทำวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.), ทุนการทำวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.) ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอระลึกถึงคุณพระศรีรัตนตรัย คุณครูบาอาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ และที่สำคัญขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่ได้ให้การ เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนให้กำลังใจ ด้วยความรักและความเข้าใจ ทำให้ ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

อุษา ยิ่งชล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	Error! Bookmark not defined.
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	Error! Bookmark not defined.
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ต
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ผ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรีक्षणัรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กากมันสำปะหลัง	4
2.1.1 องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง	4
2.2 กระบวนการบำบัดขั้นต้นวิธีทางกายภาพและเคมี	10
2.2.1 กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic pretreatment)	10
2.2.2 กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยอุณหภูมิ (Thermal pretreatment)	11
2.2.3 กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยโอโซน (Ozone pretreatment)	12
2.2.4 กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยกรด (Acid pretreatment)	12
2.2.5 กระบวนการบำบัดก่อนด้วยภาวะด่าง (Alkaline pretreatment)	14
2.3 การย่อยสลายกากมันสำปะหลัง	18
2.3.1 ผลของน้ำตาลรีดิวิซ์	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3	การผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง	23
2.3.4	กลไกการเกิดไบโอแก๊สในถังปฏิกรณ์	29
2.3.5	แบบจำลองการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนหมายเลข 1 ของ IWA (The IWA Anaerobic Digestion Model No. 1: ADM1).....	35
2.4	เหล็กประจุศูนย์.....	42
2.4.1	คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties).....	42
2.4.2	กระบวนการรีดักชันด้วยเหล็กประจุศูนย์.....	43
2.4.3	กลไกการทำงานของเหล็กประจุศูนย์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส	45
2.4.4	ไคเนติกระหว่างเหล็กประจุศูนย์ในการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง	49
2.4.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอแก๊ส โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส	50
2.4.6	มาตรฐานน้ำทิ้งของเหล็ก	53
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	54
3.1	สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์	54
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	54
3.1.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	55
3.2	วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	55
3.2.1	กากมันสำปะหลัง	55
3.2.2	เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (Seed).....	56
3.2.3	เหล็กประจุศูนย์.....	57
3.3	รูปแบบของการทดลอง.....	57
3.3.1	การศึกษาผลของพีเอช อุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส	57
3.3.2	ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง	60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การวิเคราะห์ข้อมูล	66
3.5	พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด	67
3.5.1	การวิเคราะห์ส่วนประกอบด้านธาตุอาหารของกากมันสำปะหลัง	67
3.5.2	การวิเคราะห์ส่วนประกอบของจุลินทรีย์	71
3.5.3	วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง	72
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล	75
4.1	ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย ที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส.....	75
4.1.1	องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง	76
4.1.2	ผลการศึกษา pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมัน ระเหยง่าย	78
4.1.3	ผลของการเกิดไบโอแก๊สเนื่องจากกรดไขมันระเหยง่าย	79
4.1.4	ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	83
4.2	ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง.....	85
4.2.1	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS.....	85
4.2.2	ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส	123
4.2.3	ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส	149
4.3	ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบชุดข้อมูลทั้ง 3 ชุดการทดลอง	177
4.3.1	การเปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณ ไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในสภาวะควบคุม	177
4.3.2	การเปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS.....	178
4.3.3	การเปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100° เวลา ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS.....	180

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิสดักกมันสำปะหลัง.....	181
5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	190
5.1 สรุปผลการศึกษา	190
5.1.1 ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขี้ต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมัน ระเหยง่ายที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส	191
5.1.2 ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง	192
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	194
5.3 ข้อเสนอแนะ	195
5.3.1 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์.....	195
5.3.2 งานวิจัยในขั้นต่อไป.....	195
รายการอ้างอิง	198
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขี้ต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมัน ระเหยง่าย ที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส.....	215
ภาคผนวก ข ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS.....	238
ภาคผนวก ค ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส	259
ภาคผนวก ง ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส	278
ภาคผนวก จ รายการคำนวณความคุ้มค่าในการดำเนินงาน	299
ภาคผนวก ฉ บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	303
ประวัติผู้เขียน.....	358

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง..... 4
2.2	สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน (Beynum และ Roles, 1985)..... 6
2.3	ชนิดของเยื่อใยในกากมันสำปะหลัง (Dry matter) (พรณวิไล, 2545)..... 7
2.4	ผลิตภัณฑ์กรดที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอะไมโลสและมอลโทสด้วยสารต่าง 16
2.5	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส Periodate-oxidized Starch..... 17
2.6	สรุปการศึกษางานวิจัยการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังสามารถสรุปดังตารางต่อไปนี 28
2.7	แสดงการจำแนกและลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์..... 33
2.8	ตัวแปลค่าการกระเหยง่ายเทียบค่าซีไอดี (Laboratory Manual, 1993) 34
2.9	ผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายกลูโคส (กิตติคุณ ทรยานนท์, 2552)..... 39
2.10	สรุปการศึกษางานวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สโดยใช้เหล็กประจุศูนย์สามารถสรุปดังตารางต่อไปนี 52
3.1	ลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษา..... 56
3.2	ลักษณะเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา..... 56
3.3	ออกแบบการทดลอง ศึกษาพีเอช และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิสกากแป้งมันสำปะหลัง (กิตติกานท์ สุขวานิชย์, 2554) 58
3.4	ความถี่ในการเก็บตัวอย่างและวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 66
4.1	องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง 77
4.2	องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง 77
4.3	สรุปผลการศึกษา การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตไบโอแก๊ส ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังต่อน้ำหมักกรดต่างๆ..... 82
4.4	ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุด เทียบกับการผลิตไบโอแก๊สที่ pH อื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA)..... 83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.5	ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิตไบโอแก๊สแตกต่างกัน โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)	84
4.6	ชนิด ขนาด และความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ ที่ใช้ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส	86
4.7	ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เมื่อเติมเหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS เข้าสู่การหมัก โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA)	94
4.8	ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เมื่อเติมเหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS เข้าสู่การหมัก โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD).....	95
4.9	ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA).....	126
4.10	ผลการทดสอบ Post Hoc ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD).....	127
4.11	ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA).....	152
4.12	ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)	153

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของปริมาณไบโอแก๊สที่สภาวะควบคุมทั้ง 4 สภาวะที่ทำการทดลอง โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA)	177
4.14 เปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.1 และการทดลองที่ 4.2.2	179
4.15 เปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.2 และการทดลองที่ 4.2.3	180
4.16 ปริมาณสารเคมีที่เตรียมเพื่อใช้ในการปรับพีเอชในกระบวนการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง	182
4.17 ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลองสำหรับช่วง pH 1-13 ที่ pH เริ่มต้น 4.23.....	183
4.18 ค่าสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ในการศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย ที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของ แก๊สหุงต้ม (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ต่อ กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาหมัก 60 วัน	184
4.19 ค่าสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของ แก๊สหุงต้ม (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ต่อ กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาหมัก 60 วัน.....	185
4.20 ค่าสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ในการศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของ แก๊สหุงต้ม (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ต่อ กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาหมัก 60 วัน	186

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.21	ค่าสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ในศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของ แก๊สหุงต้ม (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ต่อ กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาหมัก 60 วัน	187
ก.1	ผลการทดสอบหา %TS ระหว่างกากมันสำปะหลัง 100 g ต่อน้ำหมักกรด	216
ก.2	ผลของการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ในรูปของน้ำตาลรีดิวิซ์และกรดไขมันระเหยง่าย	219
ก.3	พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก.....	220
ก.4	พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดภายหลังการหมักที่เวลา 60 วัน	221
ก.5	ปริมาณ ไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน	222
ก.6	ปริมาณ ไบโอแก๊สสะสม (m ³ /kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน	226
ก.7	ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิตไบโอแก๊สแตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD).....	230
ก.8	ผลการทดสอบความเหมือนกันของชุดข้อมูล	237
ข.1	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดก่อนกระบวนการหมัก	240
ข.3	ปริมาณ ไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน	242
ข.4	ปริมาณ ไบโอแก๊สสะสม (m ³ /kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน	246
ข.5	ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุดเทียบกับปริมาณ ไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS.....	251
ข.6	ผลการทดสอบความเหมือนกันของชุดข้อมูล	258

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ที่สภาวะการไฮโดรไลซิสกากมัน สำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที..	260
ค.2 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดภายหลังการหมักที่เวลา 60 วัน ที่สภาวะการไฮโดรไลซิสกากมัน สำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที..	261
ค.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลา การหมัก 60 วัน	262
ค.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m ³ /kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ ระยะเวลาการหมัก 60 วัน	267
ค.5 ผลการทดสอบ Post Hoc ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบ โอแก๊สสูงที่สุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การ วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD).....	272
ค.6 ผลแสดงความเหมือนกันของชุดข้อมูล.....	277
ง.1 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมัน สำปะหลัง ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS.....	281
ง.2 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดภายหลังการหมักที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสกาก มันสำปะหลัง ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS	282
ง.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลา การหมัก 60 วัน	283
ง.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m ³ /kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ ระยะเวลาการหมัก 60 วัน	287
ง.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)	292
ง.6 ตารางเปรียบเทียบความเหมือนกันของข้อมูล.....	298

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างอะไมโลส (Tester, Karkalas and Qi, 2004)5
2.2	โครงสร้างอะไมโลเพกติน (Tester, Karkalas and Qi, 2004)5
2.3	โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของลิกโนเซลลูโลส (Lee et al., 2008)6
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส (Stenius, 2000)7
2.5	โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส (Laine, 2005)8
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน (Brunow et al., 1998).....9
2.7	ขั้นตอนการไฮโดรไลซิสแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส (กัลยา จันทร์อรุณ, 2533).....13
2.8	สูตรโครงสร้างของ (ก) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และ (ข) คีโตน (ketone).....18
2.9	สูตรโครงสร้างของ (ก) กลูโคส (ข) แมนโนส (ค) ฟรุคโตส (ง) กาแล็กโทส19
2.10	สูตรโครงสร้างของ (ก) ซูโครส (ข) มอลโทส (ค) แล็กโทส.....20
2.11	ผังแสดงระบบการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง.....24
2.12	เส้นทางการย่อยสลายกากมันสำปะหลังไปเป็นน้ำตาลรีดิวิซ์ (Li et al., 2015)26
2.13	ขั้นตอนการย่อยสลายกากมันสำปะหลังทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก27
2.14	ถึงปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์29
2.15	ถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันหรือถึงปฏิกรณ์ทุบular30
2.16	การทำงานของ Batch reactor ในช่วงเวลาต่างๆ.....32
2.17	กระบวนการเปลี่ยนแปลงในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในแบบจำลอง ADM136
2.18	กระบวนการทางชีวเคมีในแบบจำลองแบบไร้ออกซิเจน (Liang et al., 2013)38
2.19	การใช้แบบจำลองใน CSTR ขั้นตอนเดียว40
3.1	ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาผลของพีเอช และอุณหภูมิ59
3.2	ขั้นตอนการเดินระบบเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็ก.....61
3.3	ขั้นตอนการเดินระบบเพื่อศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส...63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	ขั้นตอนการเดินระบบเพื่อศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส....65
3.5	XRD Standard สำหรับเหล็กประจุศูนย์.....74
4.1	การเกิดน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3% TS ด้วยกรดและเบสที่ pH 1 - 13, อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที..... 78
4.2	(ก) ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ข) อัตราการเกิดไบโอแก๊สสะสม สำหรับการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดและเบส ที่ pH 1 – 13 , อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที.....79
4.3	ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%) pH ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส.....82
4.4	ลักษณะทางกายภาพของฝอยเหล็กที่ใช้ในการศึกษา.....85
4.5	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฝอยเหล็กที่ใช้ในการศึกษา เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) (ก) ภาพด้านบน (Top View) ของชิ้นงานที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ภาพด้านบน (Top View) ของชิ้นงานที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ค) ภาพด้านข้าง (Side View) ของชิ้นงานที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) ภาพด้านข้าง (Side View) ของชิ้นงานที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....87
4.6	XRD pattern ของฝอยเหล็กที่ใช้ในการศึกษา จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta ประมาณ 45 Theta ซึ่งเป็นตำแหน่งของเหล็กประจุศูนย์ (Zero valent iron; Fe ⁰) เมื่อเทียบกับ Standard pattern.....88
4.7	กากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 1- pH 13, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อผลิต ไบโอแก๊ส ปริมาณกากมันสำปะหลังสดที่ใช้คือ 100 กรัม ต่อ ปริมาณน้ำหมักกรด 850 ml ซึ่งปริมาณกากมันสำปะหลังสดต่อน้ำหมักกรดที่ใช้ มีความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 3% TS.....89
4.8	(ก) ปริมาณไบโอแก๊สที่สะสม (ข) อัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสม ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดและเบส ที่ pH 1 – 13 , อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 100 g/kg TVS ที่เวลา 60 วัน91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%) ในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS.....96
4.10	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 1 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้97
4.11	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 2 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้.....99
4.12	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 3 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้101
4.13	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 4 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมัน สำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 5 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	105
4.15 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมัน สำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 6 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	107
4.16 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมัน สำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 7 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	109
4.17 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมัน สำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 8 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	111
4.18 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมัน สำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 9 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	113

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	115
4.20 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 11 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	117
4.21 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 12 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	119
4.22 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วย pH 13 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	121
4.23 การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยเบสที่ pH 10 , อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที.....	123
4.24 (ก) ปริมาณไบโอแก๊สที่สะสม (ข) อัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสม ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง pH 10 , อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 20 - 200 g/kg TVS	124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25	ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%) ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส128
4.26	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 20 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้129
4.27	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 40 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้131
4.28	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้133
4.29	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 80 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้135

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	137
4.31 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 120 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	139
4.32 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 140 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	141
4.33 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 160 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	143
4.34 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 180 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	145

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 200 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้147
4.36	การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ด้วยด่าง ที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5-55 นาที.....149
4.37	ก) ปริมาณไบโอแก๊สที่สะสม (ข) อัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสม ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ที่ pH 10 , อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5-55 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 60 g/kg TVS150
4.38	ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%) ในการศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส.....154
4.39	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้155
4.40	XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้157

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	159
4.42 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	161
4.43 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	163
4.44 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	165
4.45 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	167

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	169
4.47 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	171
4.48 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	173
4.49 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 55 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้	175
4.50 ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม SPSS และขอบเขตที่ยอมรับได้ (t_{cr}) ที่ได้จากการเปิดตาราง Appendix-statistical ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	179
4.51 ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม SPSS และขอบเขตที่ยอมรับได้ (t_{cr}) ที่ได้จากการเปิดตาราง Appendix-statistical ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	181
ก.1 การทดลองแบบ Batch เพื่อศึกษา pH และ อุณหภูมิเพื่อเพิ่มกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส	219

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.1 การทดลองแบบ Batch เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุ ศูนย์ 100 g/kg TVS.....	239
ข.2 ลักษณะเหล็กประจุศูนย์ภายหลังการหมักกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตไบโอแก๊สที่ระยะเวลา 60 วัน.....	239
ค.1 ถังปฏิกริยาแบบ Batch ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอ แก๊ส.....	260
ง.1 ถังปฏิกริยาแบบ Batch ที่ใช้ในการศึกษาเวลาในการทำปฏิกริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอ แก๊ส.....	279
ง.2 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กประจุศูนย์ในเวลากการทำปฏิกริยาการย่อยสลายกากมัน สำปะหลังที่แตกต่างกัน ภายหลังการหมักที่เวลา 60 วัน.....	280

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

pH	=	พีเอช
TS	=	ของแข็งทั้งหมด
TVS, VS	=	ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด
TCOD, COD	=	ซีโอดีทั้งหมด
TBOD, BOD	=	บีโอดีทั้งหมด
TKN	=	ไนโตรเจนที่เป็นสารอินทรีย์และแอมโมเนียไนโตรเจน
TP	=	ฟอสฟอรัสทั้งหมด
VFA	=	กรดอินทรีย์ระเหยง่าย
ZVI	=	เหล็กประจุศูนย์
°C	=	องศาเซลเซียส
m ³	=	ลูกบาศก์เมตร
kg	=	กิโลกรัม
g	=	กรัม
L	=	ลิตร
ml	=	มิลลิลิตร
μ_{max}	=	อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (ต่อเวลา)
S_1	=	ความเข้มข้นของสารอาหารในถังปฏิกรณ์ (น้ำหนักต่อปริมาตร)
K_s	=	ความเข้มข้นของสารอาหาร ณ จุดที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด (น้ำหนักต่อปริมาตร)
k_d	=	สัมประสิทธิ์การสลายตัวของจุลินทรีย์ (ต่อเวลา)
S_i	=	ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (น้ำหนักต่อปริมาตร)
θ_c	=	เวลาเก็บกัก (เวลา)
X_1	=	ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ (น้ำหนักต่อปริมาตร)
k	=	อัตราการใช้สารอาหารสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยจุลินทรีย์
Y	=	สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตสูงสุดของจุลินทรีย์ (น้ำหนักต่อน้ำหนัก)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

C_A	=	ความเข้มข้นของสาร A
A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกรณ์
x	=	ระยะจากทางเข้าของถังปฏิกรณ์
Δx	=	ความยาวของปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรน้อยยิ่ง
$n_A _x, n_A _{x+\Delta x}$	=	อัตราไหลของโมลของ A ที่ระยะ x และ $x + \Delta x$ จากทางเข้าของถังปฏิกรณ์
r_A	=	อัตราการผลิตของสาร A
CH_4	=	ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน, ml/day
CF	=	Correction Factor สำหรับคำนวณค่า COD จากแก๊สมีเทน (ที่ระดับน้ำทะเล), ml มีเทนขึ้นเทียบเท่า 1 g COD (Conversion Factor (CF) สำหรับคำนวณค่า COD จากแก๊สมีเทน
Q	=	ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบต่อวัน, L/day
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
H_2SO_4	=	กรดซัลฟิวริก
Na_2CO_3	=	โซเดียมคาร์บอเนต
HNO_3	=	กรดไนตริก
H_0	=	ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05
H_1	=	ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05
μ	=	ค่าเฉลี่ยของไบโอแก๊สแต่ละกลุ่มการศึกษา

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของแป้งและเส้นใยที่สูง (Sriroth et al., 2000a) ทำให้กากมันสำปะหลังได้รับความสนใจเพื่อนำมาใช้ในการผลิตไบโอแก๊สมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่าการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังยังมีโครงสร้างที่จำกัด เนื่องจากโครงสร้างหลักของกากมันสำปะหลังประกอบด้วย ลิกโนเซลลูโลส และขนาดธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดได้ไม่สมบูรณ์ในเวลาจำกัด (พิชญา สวยสม, 2550) อัตราการสร้างแก๊สจึงต่ำ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการย่อยสลายกากมันสำปะหลัง ได้มีการศึกษา ผลของการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดต่อการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง (มาศยา โวคสงวน, 2553) การเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและด่าง ที่สารต่างสภาวะพีเอช (pH) 13 อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 90 นาที โดยปริมาณไบโอแก๊สสะสมภายหลังการหมัก 30 วันมีค่าเท่ากับ 1.2 m³/kg TS หรือ 0.19 m³/kg wet weight ซึ่งมากกว่าของกรณีการใช้กากมันที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซิสถึง 3 เท่า (กิตติกานต์ สุขวานิชย์, 2554)

การไฮโดรไลซิส เป็นปฏิกิริยาทางเคมีชนิดหนึ่งที่โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทนที่โมเลกุลของสารที่มีอยู่แล้ว ทำให้แตกพันธะออก หรือการแยกสลายด้วยน้ำ (สันติ เตชะกัมพูช, 2548) การไฮโดรไลซิสแป้งและเซลลูโลส สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid Hydrolysis) การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (Alkaline Hydrolysis) และการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) สามารถเปลี่ยนกากมันสำปะหลัง แป้ง/Starch และเซลลูโลส (C₆H₁₀O₅)_n ซึ่งประกอบด้วย อะไมโลส (α-1,4) และอะไมโลเพกติน (α-1,6) ให้กลายเป็น น้ำตาลกลูโคส/Glucose n(C₆H₁₂O₆) หรือน้ำตาลรีดิิวซ์ ในระยะเวลาที่จำกัดได้ (กัลยา จันทรอรุณ, 2533) และเปลี่ยนจากน้ำตาลรีดิิวซ์ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยได้ ยังมีข้อจำกัด คือ กรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จากกระบวนการย่อยสารอินทรีย์มีหลายชนิด ซึ่งบางชนิดแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมีเทนได้ โดยเป็นกรดไขมันระเหยง่ายขนาดใหญ่ เช่น กรดโพรไพโอนิก และ กรดบิวทิริก (McCarty, 1986; Tatara et al., 2008)

นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนกรดโพไฟฟอนิกไปเป็นกรดอะซิดิกไม่สามารถเกิดขึ้นได้จนกว่า ความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนจะลดลงน้อยกว่า 10 (Pa) (Tatara et al., 2008; Li et al., 2009)

เหล็กประจุศูนย์ เป็นวัสดุโลหะราคาถูก เป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ที่แรง (Farrell et al., 2000) หรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ดี เนื่องจากมีศักย์การนำไฟฟ้าต่ำกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมีเทน คือมีค่า $E^0 = -0.447$ V (Klas and Kirk, 2013) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับ นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย, การผลิตน้ำบริสุทธิ์จากน้ำบาดาล และการฟื้นฟูดิน (Jiang et al., 2011) สำหรับในการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าเหล็กประจุศูนย์มีความสามารถในการเกิด oxidation-reduction potential (ORP) ซึ่งทำให้แก๊สมีเทนในระบบไร้อากาศเพิ่มขึ้น หลังจากนั้น (Feng et al., 2014) ได้ศึกษาการใช้เหล็กประจุศูนย์สำหรับน้ำเสียจากถังตกตะกอนขั้นที่ 2 ต่อและพบว่าเหล็กประจุศูนย์สามารถเพิ่มแก๊สมีเทนได้ 43.5% จากเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มเข้ามาในระบบ 10 g/L ต่อมา (Zhang et al., 2015) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนในน้ำเสียจากถังตกตะกอนขั้นที่ 2 โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ภายหลังที่มีการปรับสภาพตะกอนโดยใช้กรดและด่าง จะพบว่าเหล็กประจุศูนย์สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ถึง 91.5% จากเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มเข้ามาในระบบ 10 g/L

การศึกษานี้ครั้งนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส จากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ โดยศึกษาผลของ พีเอช และ อุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มกรดไขมันระเหยง่ายและศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาผลของ พีเอชและอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส
- 1.2.2 ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ใช้กากมันสำปะหลังและน้ำหมักกรดจากบริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด ตั้งอยู่ที่ 61 หมู่ 3 ถนนราชสีมา-ปักธงชัย ตำบลหนองจะบก อำเภอเมือง นครราชสีมา จังหวัด นครราชสีมา 30000

- 1.3.2 การทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ซื้อจากบริษัท โคมเซ็นเตอร์ฟอยท์ จำกัด ตั้งอยู่ที่ 31 ถนนบูรินทร์ บ.ข.ส. ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัด นครราชสีมา 30000 ประกอบไปด้วยเหล็กประจุศูนย์ประมาณ 99.99%
- 1.3.3 ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS (Statistics Package for the Social Sciences)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการบำบัดขั้นต้น
- 1.4.2 สามารถทราบถึงปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ไบโอแก๊สสูงสุด

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและโรงงานผลิตฟรุกโตสและสารให้ความหวาน มีการใช้กากมันสำปะหลังเปียกนี้เป็นอาหารสัตว์ อาทิ อาหารโค กระบือ และปลา อีกทั้งกากมันสำปะหลังก็ยังคงมีคุณค่าทางอาหารเหลืออยู่โดยเฉพาะใน ส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ข่อยง่าย (Nitrogen free extract, NFE) ประมาณ 65-70 % สามารถนำมาใช้ในเชิงอาหารสัตว์ได้โดยตรง (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณ วาจกสิกิจฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550) และการนำกากมันสำปะหลังมาผลิตไบโอแก๊สอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้วัสดุเหลือให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2.1.1 องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง

องค์ประกอบของกากมันสำปะหลังแตกต่างกันตามคุณภาพของหัวมันสำปะหลัง และประสิทธิภาพในการสกัดแป้งในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังของแต่ละโรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

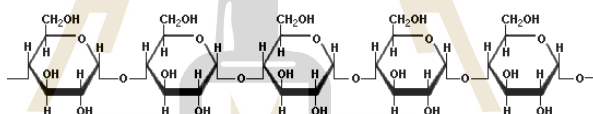
อ้างอิง	ส่วนประกอบ (กากเปียก 100 กรัม)					
	แป้ง (%)	ความชื้น (%)	เถ้า (%)	โปรตีน (%)	เยื่อใย (%)	ไขมัน (%)
ปรีดา และคณะ (2552)	47.97	88.60	5.73	3.42	14.75	0.50
สุเมธ และคณะ (2552)	50.20	89.12	5.32	2.35	14.57	0.53
วริษา และคณะ (2552)	50.10	89.50	2.37	0.39	13.99	5.73
ไกรวุฒิ พ่วงเพชร (2550)	66.22	97.79	2.65	3.39	15.26	0.24
Khempaka et al. (2009)	53.55	93.22	2.83	1.98	13.59	0.13
Teerapatr et al. (2006)	65.37	80.13	2.01	2.05	13.17	0.15

2.1.1.1 โครงสร้างของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย C:H:O ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้ง (Starch) เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกติน) วางตัวในแนวรัศมีแสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้ง โดยอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของแป้ง (กล้าณรงค์ เกื้อกุล, 2550)

1. อะไมโลส (amylose)

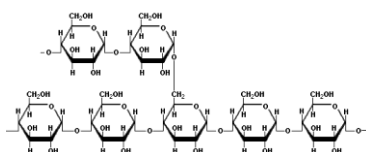
พอลิเมอร์เชิงเส้น ที่ประกอบไปด้วยหน่วยของ D(+) กลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา -1,4 (α - 1,4) เกาะกันเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.1 ในแป้งมีอะไมโลสอยู่ประมาณ 20 - 25% ของแป้งทั้งหมด



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะไมโลส (Tester, Karkalas and Qi, 2004)

2. อะไมโลเพกติน (amylopectin)

พอลิเมอร์เชิงกิ่งหรือแตกแขนงของกลูโคส โดยแกนของอะไมโลเพกตินจะจับกับพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา -1,4 (α - 1,4) และส่วนที่มีการแตกแขนงเป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา -1,6 (α - 1,6) โดยทั่วไปในแป้งจะมีอะไมโลเพกติน อยู่ประมาณ 75 - 85% ของแป้งทั้งหมด (รูปที่ 2.2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่กำหนดความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาคัวยกรดและเอนไซม์ สรุปรูปได้ดังตารางที่ 2.2



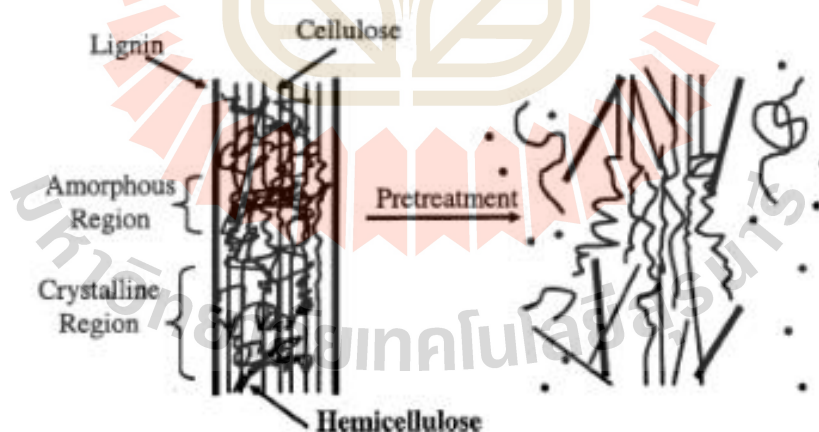
รูปที่ 2.2 โครงสร้างอะไมโลเพกติน (Tester, Karkalas and Qi, 2004)

ตารางที่ 2.2 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน (Beynum และ Roles, 1985)

คุณสมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับพันธะกลูโคซิดิก	α -1,4	α -1,4 และ α -1,6
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 1,000 หน่วยกลูโคส
การละลายน้ำ	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดี
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะ จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

2.1.1.2 โครงสร้างของเส้นใย

เส้นใยเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของพืช โดยประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในอัตราส่วนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (ตารางที่ 2.3) โดยทั่วไปพบเซลลูโลส 40 - 60% เฮมิเซลลูโลส 20 - 30% และลิกนิน 15 - 30% (Lee et al., 2008)



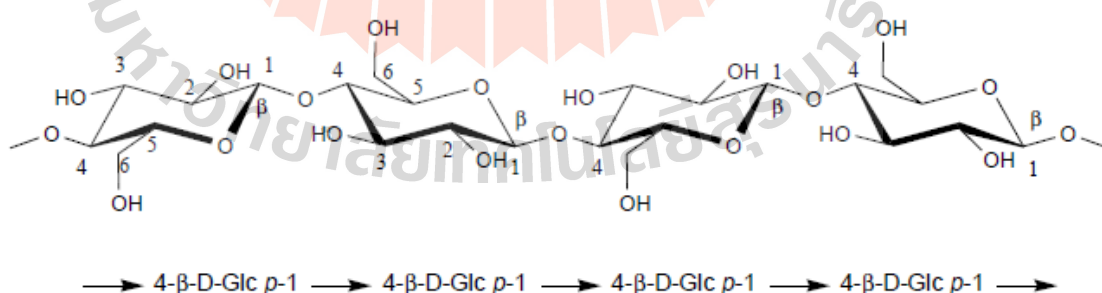
รูปที่ 2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของลิกโนเซลลูโลส (Lee et al., 2008)

ตารางที่ 2.3 ชนิดของเชื้อใยในกากมันสำปะหลัง (Dry matter) (พรรณวิไล, 2545)

เอกสารอ้างอิง	ส่วนประกอบภายในเซลล์พืช (%)			
	ไฟเบอร์	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ธงชาติ สุริยวงศ์ (2556)	9.20	3.30	10.20	11.40
Ali et al. (2011)	20.10	8.10	2.80	2.20
Rattanachomsri et al. (2009)	23.00	15.60	4.60	2.80
Suksombat et al. (2006)	6.60	5.90	27.80	3.90

1. เซลลูโลส (Cellulose)

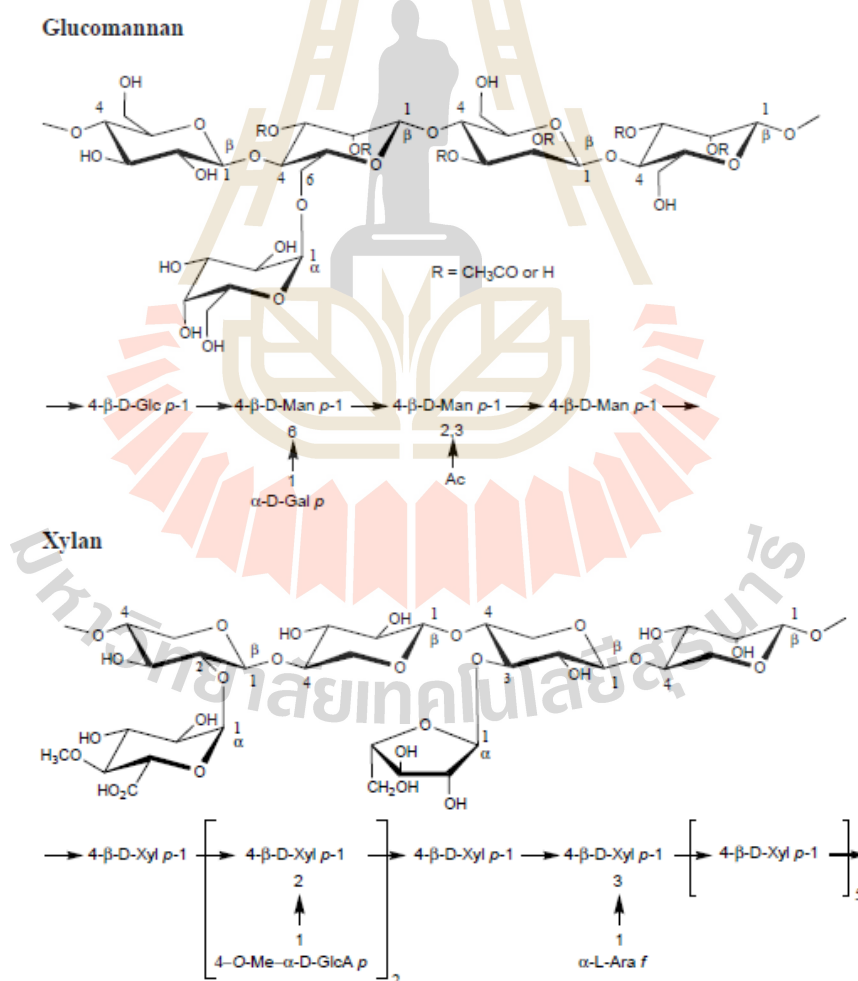
เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ ที่มีประมาณ 40 - 50% ในผนังเซลล์พืช ลักษณะเป็นพอลิเมอร์สายตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา และเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) ของ β -D-glucose ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glucosidic linkage โดยมีค่า degree of polymerization อยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึงมากกว่า 10,000 เกาะรวมกันภายใน crystalline microfibrils เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 20,000 ถึง 750,000 ดาลตัน ซึ่งเท่ากับ 100 - 4,000 หน่วยกลูโคส โมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวกันเป็นมัดเรียกว่า fibril โดยมีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลกลูโคสที่อยู่ใกล้กันของเซลลูโลสสายหนึ่ง กับเซลลูโลสอีกสายหนึ่งเชื่อมต่อกันเป็น fibril ดังรูปที่ 2.4 นอกจากเซลลูโลสที่พบทั้งในไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็งมีความทนต่อกรดได้มากกว่าเฮมิเซลลูโลส (กัลยา อยู่นาน, 2546)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส (Stenius, 2000)

2. เซมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

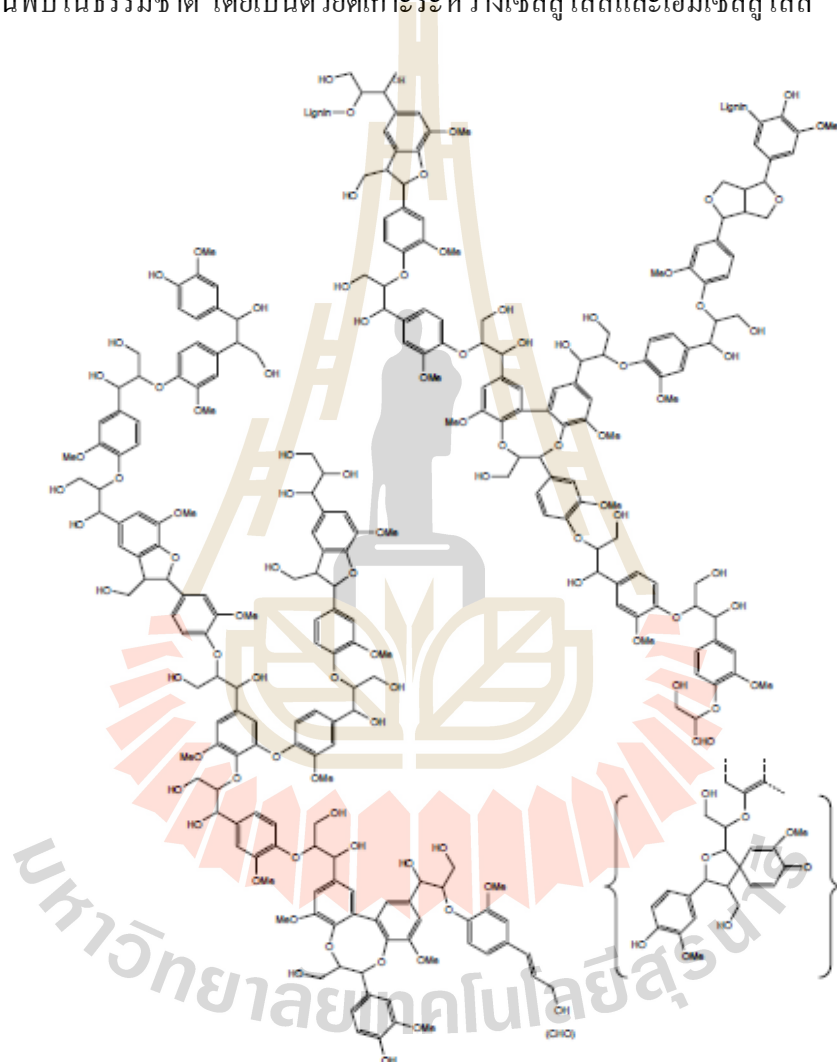
เซมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพวก amorphous polymeric carbohydrate พบมากในไม้เนื้อแข็งเปลือกพวกพืชตระกูลหญ้า ละลายในสารละลายที่เป็นด่างเจือจาง ปกติจะอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและลิกนินในผนังของเซลล์พืช โครงสร้างของเซมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็น hetroglycan ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดมาต่อกัน เช่น β -D-xylopyranose, α -L-arabofuranose, β -D-glucopyranose, α -D-galactopyranose, β -D-mannopyranose, α -L-rhamnopyranose และ β -L-fucopyranose ซึ่งน้ำตาลทั้งหมดมีลักษณะเป็น pyranose form ยกเว้น arabofuranose ที่มีลักษณะเป็น furanose form acid เซมิเซลลูโลสในพืชทั่วไป มีโครงสร้างหลัก (back bone) เป็นพอลิเมอร์ ของน้ำตาลไซโลส ที่เชื่อมต่อกันด้วย 1,4- β -linkage โดยมี branch chain เป็นน้ำตาล pentose, hexose หรือ uronic acid



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของเซมิเซลลูโลส (Laine, 2005)

3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบ aromatic ซึ่งหมู่ $-OH$ group สามารถสร้างพันธะกับหมู่ aldehyde เป็น hemiacetal และหมู่ ketone ได้เป็น ketals โครงสร้างของลิกนิน แสดงดังรูปที่ 2.6 ลิกนินมีความต้านทานต่อจุลินทรีย์ และ anaerobic process ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ aromatic ring ของลิกนินได้ หรือถ้าเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ก็จะช้ามากและเป็นเวลาหลายวัน ลิกนินพบในธรรมชาติ โดยเป็นตัวยึดเกาะระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน (Brunow et al., 1998)

2.2 กระบวนการบำบัดขั้นต้นวิธีทางกายภาพและเคมี

เนื่องจากวัสดุชีวมวลมีความสลับซับซ้อนของโครงสร้าง จึงไม่ง่ายต่อการบำบัดเบื้องต้น ใดอย่างหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ใบข้าวโพดใช้การบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดเจือจาง มีแนวโน้มต่อประสิทธิภาพที่ดี แต่วิธีนี้ไม่มีประสิทธิภาพต่อฟางข้าวโพด ผลึกของเซลลูโลสที่ใช้ประโยชน์ได้ถูกจำกัดด้วยพื้นผิวโดยลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งปัจจัยดังกล่าวเป็นผลต่ออัตราการย่อยสลาย แสดงให้เห็นผลของการบำบัดเบื้องต้นต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์

2.2.1 กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic pretreatment)

กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิกเป็นเทคนิคใหม่สำหรับการปรับสภาพตะกอน และเป็นวิธีที่เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพของตะกอนได้ดีมาก เนื่องจากกระบวนการอัลตราโซนิกจะเข้าไปเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพของตะกอน ซึ่งความสามารถการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับปัจจัยการก่อให้เกิดเสียงและลักษณะสมบัติของตะกอน (Pilli et al., 2011) โดยมีกลไกการทำลายตะกอน 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการทำลายฟล็อก เพื่อลดขนาดของอนุภาคและทำลายพื้นผิวของฟล็อกเพื่อปลดปล่อยสารภายนอกเซลล์ ขั้นตอนที่สองเป็นการทำให้เซลล์แตกตัว เพื่อให้สารอินทรีย์ภายในเซลล์ได้เป็นอิสระ แต่ส่วนมากสารอินทรีย์เหล่านี้จะเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นในขั้นตอนสุดท้ายจึงต้องทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ดังกล่าวให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กและสายโซ่สั้นลง ซึ่งในระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ละลายน้ำและสารอินทรีย์โมเลกุลต่ำจะถูกปล่อยออกมา ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยตะกอนเพิ่มขึ้น โดยการลดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น นอกจากนี้กระบวนการ อัลตราโซนิกยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนในขั้นตอนสุดท้ายลง เนื่องจากตะกอนที่เกิดขึ้นมีความเสถียรมากขึ้น (Chang et al., 2011)

กระบวนการอัลตราโซนิกเป็นการทำให้เกิดโพรงอากาศซึ่งจะก่อตัวเป็นฟองอากาศขึ้นในของเหลว โดยฟองอากาศเหล่านี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและแตกสลายอย่างรุนแรงเมื่อถึงขนาดวิกฤติ ทำให้เกิดการยุบตัวของโพรงอากาศอย่างรุนแรงจนก่อให้เกิดความร้อน และความดันสูงขึ้น ที่บริเวณรอยต่อระหว่างของเหลวกับแก๊ส ทำให้เกิดความปั่นป่วนและการเฉือนที่สูงในส่วนของเหลวและทำให้เกิดการก่อตัวของสารอนุมูล ซึ่งการย่อยสลายตะกอนด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อทำการย่อยที่ความถี่ต่ำ เนื่องจากทำให้การละลายตัวของอนุภาคดีขึ้น (Bougrier, Albasi, Delgenes, and Carrere, 2006) เช่นการศึกษาของ Kim et al. (2003) พบว่าเมื่อนำตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียผ่านกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกที่ 42 kHz เป็นระยะเวลา 10 - 120 นาที มีการควบคุมอุณหภูมิ 25 °C ที่ระยะเวลา 120 นาที สามารถเพิ่มค่า

ความสามารถซีไอคือละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 18 แต่อย่างไรก็ตามอัตราไซคลิกเป็นวิธีที่ต้องการพลังงานในการบำบัดสูงถึง 1,000-16,000 kJ/kg_{TS} ขึ้นกับความเข้มข้นของ TS ในตะกอน

2.2.2 กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยอุณหภูมิ (Thermal pretreatment)

กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยอุณหภูมิเป็นการใช้ความร้อนในการรบกวนพันธะเคมีของผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดการละลายขององค์ประกอบของเซลล์ (Appels, Baeyens, Degreve, and Dewil, 2008) ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยตะกอนเพิ่มขึ้น แต่ต้องใช้พลังงานจำนวนมาก และอาจจะก่อให้เกิดการสะสมของสารพิษ และสารที่สามารถทนความร้อนได้ และการเสื่อมของเอนไซม์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการย่อย ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการย่อยที่อุณหภูมิสูง โดยการก่อตัวของสารทนไฟเป็นผลมาจากปฏิกิริยามิลลาร์ด (Maillard reaction) โดยเกิดจากการที่น้ำตาลและกรดอะมิโนทำปฏิกิริยากับสารเมลานอยด์ (Melanoids) ซึ่งเป็นสารที่ขยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน และอาจจะก่อให้เกิดสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ อย่างไรก็ตามการย่อยที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ปริมาณเชื้อโรคในตะกอนลดลงได้อย่างมาก แต่มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง และมีความยุ่งยากในการเดินระบบ และไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงปริมาณไบโอแก๊สที่เพิ่มขึ้นจากการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้อย่างชัดเจน และไม่มีความสำคัญ (Nges and Liu, 2009) แต่การย่อยที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ความสามารถการย่อยสลายทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิกและคุณสมบัติการแยกน้ำออกจากตะกอนมีค่ามากขึ้น การให้ความร้อนทั่วไปนั้น ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 - 180 °C แรกเริ่มเฮมิเซลลูโลสเริ่มละลายต่อจากนั้นคือส่วนของลิกนิน โดยวิธีการนี้จะมีการผลิตส่วนประกอบของฟีนอล ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของลิกนิน ส่วนสารประกอบเฟอร์ฟิวรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัล เกิดจากการสลายตัวของน้ำตาล ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะเกิดได้ดียิ่งในสภาวะเป็นกรด สารเหล่านี้เป็นสาเหตุในการยับยั้งหรือเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ยีสต์ เมทาโนเจน โดยที่อุณหภูมิมากกว่า 220 °C ระยะเวลา 2 นาที ทำให้ผลผลิตเอทานอลเกือบจะโดนยับยั้งอย่างสมบูรณ์ จากการก่อตัวของเฟอร์ฟิวรัล และสารประกอบอื่น (ลิกนิน ละลายน้ำ) เมื่ออุณหภูมิ 250 °C หรือสูงกว่าควรหลีกเลี่ยงเนื่องจากไม่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่วนการใช้ไอน้ำ และการระเหยด้วยไอน้ำใช้ในการบำบัดเบื้องต้นชีวมวลจะไต่ลง ในถึงขนาดใหญ่ให้อุณหภูมิสูง ไอน้ำ และความดัน จากนั้นถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว ข้อแตกต่างของการใช้ไอน้ำ และการระเหยด้วยไอน้ำ คือ ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ โดยวัตถุประสงค์ของการระเหยด้วยไอน้ำ คือ หลีกเลี่ยงการเกิดสารยับยั้ง ผลดีของวิธีนี้คือกำจัดของเฮมิเซลลูโลสเป็นจำนวนมาก ทำให้เอนไซม์เข้าถึงเซลลูโลสได้ง่าย ยีสต์บางชนิดสามารถเปลี่ยนเพนโตสเป็นเอทานอล แต่การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนนั้น มีความเสี่ยงต่อการผลิต เฟอร์ฟิวรัล (Furfural) และ

ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัล (HMF) และสารละลายฟีนอล โดยสารเหล่านี้จะยับยั้งการหมักเอทานอล หรือการผลิตแก๊สมีเทนจากแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามผลผลิตแก๊สมีเทนจะเกิดขึ้นหลังจากระยะเวลา การปรับตัวของแบคทีเรีย

2.2.3 กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยโอโซน (Ozone pretreatment)

การใช้โอโซนในการย่อยสลายตะกอนเป็นเทคนิคที่ได้รับการศึกษาอย่าง กว้างขวาง ซึ่งความเข้มข้นของโอโซนที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 0.05 – 0.5 กรัม โอโซน ต่อกรัมของแข็งทั้งหมด โดยในระหว่างการย่อยโอโซนจะสลายตัวเองเข้าไปจับกับอนุภาคอิสระและ ทำปฏิกิริยากับอนุภาคอิสระเหล่านั้นทั้งหมด ทั้งในส่วนสารอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้และ สกัดส่วนสารอินทรีย์ที่เป็นอนุภาคหรือสกัดส่วนสารอินทรีย์หรือแร่ธาตุ และช่วยปรับเปลี่ยนค่าความ หนืด และการตกของตะกอนให้ดีขึ้นด้วย (Bougrier et al., 2006) การใช้โอโซนทำให้การละลาย ของตะกอนบางส่วนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโอโซนที่เติมลงไปเพิ่มขึ้น แต่หาก ปริมาณโอโซนที่เติมมีมากเกินไป จะทำให้ค่าการละลายของตะกอนลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากเกิด การออกซิเดชันสารประกอบที่ได้จากการละลายตะกอน (Carrere et al., 2010)

2.2.4 กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยกรด (Acid pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยกรด มีวัตถุประสงค์คือ การละลายเฮมิเซลลูโลสและ สามารถเข้าถึงเซลลูโลสได้ดีขึ้น สามารถใช้ได้ทั้งกรดเข้มข้นหรือกรดเจือจาง ปฏิกิริยาหลักคือ ละลายส่วนของเฮมิเซลลูโลสโดยจะได้ผลผลิตคือ โมโนเมอร์ เฟอรัล (Furfural) ไฮดรอกซี- เมทิลเฟอรัล (HMF) ส่วนของลิกนินนั้นจะรวมตัว และตกตะกอน มีความชัดเจนเมื่อใช้กรด เข้มข้นในการบำบัดเบื้องต้น การใช้กรดแก่ในการบำบัดเบื้องต้น ไม่มีความน่าสนใจเพราะเสี่ยงต่อ การก่อสารยับยั้ง มีแนวโน้มในการใช้กรดเจือจาง เพราะการใช้กรดเจือจางให้มีปริมาณสารยับยั้งใน ปริมาณที่ต่ำ การผลิตแก๊สมีเทนจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดมีความน่าสนใจมากกว่าการผลิตเอ ทานอล เนื่องจากเมทาโนเจนสามารถจัดการส่วนของเฟอรัล (Furfural) และไฮดรอกซีเมทิล- เฟอรัล (HMF) ในช่วงของการปรับตัว แต่การใช้กรดแก่เช่น ซัลฟิวริกหรือ ไนตริก มีผลทำให้ ผลผลิตมีเทนลดลงเนื่องจาก ซัลเฟตหรือ ไนเตรต เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือ ไนโตรเจน

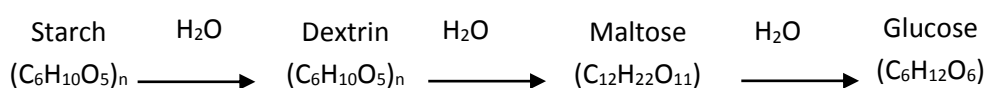
ไฮโดรไลซิส หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีชนิดหนึ่งที่โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทนที่ โมเลกุลของสารที่มีอยู่แล้ว ทำให้แตกพันธะออก หรือการแยกสลายด้วยน้ำ (สันติ เตะชะกัมพูช, 2548) การไฮโดรไลซิสแข็งและเซลลูโลส สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การไฮโดรไลซิสด้วยกรด

(Acid Hydrolysis) การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (Alkaline Hydrolysis) และการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.2.4.1 การไฮโดรไลซิสแป้งด้วยกรด

การไฮโดรไลซิสแป้งด้วยสารกรด เป็นวิธีการแรกเริ่มที่ใช้กันมานานแล้ว เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนร่วมกับกรดชนิดต่างๆ เช่น กรดเกลือ (Hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก (Sulphuric acid) กรดไนตริก (Nitric acid) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) กรดออกซาลิก (Oxalic acid) และกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) การไฮโดรไลซิสแป้งด้วยกรดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของแป้ง ถ้าค่าประมาณ 1% กรดสามารถไฮโดรไลซิสแป้งได้เป็นอย่างดี แต่หากความเข้มข้นของแป้งสูงขึ้น จะได้ปริมาณกลูโคสลดลง เช่น แป้งที่มีความเข้มข้น 20% ไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ค่าความเป็นกรด-เบส เวลา และอุณหภูมิที่เหมาะสม จะได้ปริมาณกลูโคสสูงสุดประมาณ 88% ถ้าใช้ความเข้มข้นของแป้งสูงในระดับการผลิตแบบอุตสาหกรรมประมาณ 30 - 40% จะได้ปริมาณกลูโคสจำกัด ทั้งนี้เป็นเพราะที่อุณหภูมิ 100 - 120 °C ปริมาณน้ำลดลงทำให้กลูโคสรวมตัวกัน (Reversion) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกลุ่มแอลดีไฮด์ (Aldehyde) กับกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ที่คาร์บอนตำแหน่ง C₆, C₃ หรือ C₂ ได้พันธะแอลฟา 1,6 แอลฟา 1,3 หรือแอลฟา 1,2 การใช้กรดความเข้มข้นสูงขึ้น จะมีผลทำให้อัตราการไฮโดรไลซิสเร็วขึ้น และสีของไซรัปจะเปลี่ยนแปลงเป็นสีเทาดำมากขึ้น การไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ไซรัปมีแนวโน้มที่จะเกิดสีดำ ที่อุณหภูมิเกิน 100 °C ความเข้มข้นของสีจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น (อุดมเกียรติ พรรณนประเทศ, 2536)

การไฮโดรไลซิสแป้งด้วยกรด เป็นการไฮโดรไลซิสอย่างไม่จำเพาะ และสามารถย่อยพันธะแอลฟา 1,4 ได้เร็วกว่าพันธะแอลฟา 1,6 การไฮโดรไลซิสด้วยกรดอย่างไม่สมบูรณ์ จะได้ สารละลายผสมของเดกซ์ทริน (Dextrin) ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ แล้วเดกซ์ทรินจึงแตกตัวต่อเป็นน้ำตาลมอลโทส โดยพอลิแซ็กคาไรด์เมื่อถูกไฮโดรไลซิสด้วยกรดหรือเอนไซม์ ร่วมกับการต้มจะได้กลูโคส ในที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการไฮโดรไลซิสแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส (กัลยา จันทร์อรุณ, 2533)

2.2.4.2 การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด

เซลลูโลสมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อไฮโดรไลซิสด้วยกรดแตกออกเป็น D-glucose ซึ่งเป็นโมโนแซ็กการไรด์ชนิดเดียวที่ได้รับ แต่ถ้านำเซลลูโลสไปเมธิเลชันแล้วไฮโดรไลซ์ได้ 2,3,6-tri-o-methyl-D-glucose ได้ผลเหมือนกับในกรณีของแป้ง ดังนั้นเซลลูโลสเกิดจากกลูโคสต่อกันแต่ละหน่วยต่อกันแบบไกลโคไซด์กับตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสหน่วยถัดไป (Taberazdeh, 2007)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรด คือส่วนประกอบโมโนเมอร์ ประกอบด้วย ไซโลส, แมนโนส, กลูโคส, กาแลคโทส, อาราบิโนส และส่วนประกอบจำนวนน้อยได้แก่ แรมโนส, กรดกลูคูโรนิก, กรดเมทิลกลูคูโรนิก และกรดกาแลคทูโรนิก (Taberazdeh, 2007)

2.2.5 กระบวนการบำบัดก่อนด้วยภาวะด่าง (Alkaline pretreatment)

การปรับสภาพตะกอนด้วยภาวะด่าง เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในการปรับสภาพตะกอนร่วมกับวิธีการย่อยสลายอื่นๆ เช่น การให้ความร้อน อัลตราโซนิก และไมโครโครเวฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยให้มากขึ้น โดยเฉพาะการปรับสภาพด้วยภาวะด่างร่วมกับกระบวนการอัลตราโซนิกจะทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายมากกว่ากระบวนการอื่น โดยการปรับสภาพด้วยภาวะด่างที่มีค่าพีเอชหรือไฮดรอกไซด์ไอออนสูงทำให้ โปรตีน และไขมันถูกไฮโดรไลซิส หรือที่เรียกว่า เกิดการย่อยสลายทางเคมีได้ดี จึงทำให้ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของตะกอนส่วนเกินเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ซบสเทรคทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ได้อย่างรวดเร็วขึ้น (Kim, Jeong, Oh, and Shin, 2010) การบำบัดก่อนด้วยภาวะด่างจะช่วยย่อยสลายสารพอลิเมอร์ภายนอกเซลล์ (extracellular polymeric substances; EPS) ซึ่ง EPS เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพยากหรือไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Dumas et al., 2010) เช่นการศึกษาของ Kim et al. (2003) พบว่าเมื่อนำตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียผ่านกระบวนการบำบัดก่อนด้วยภาวะด่าง ซึ่งใช้สารเคมีทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ NaOH, KOH, $Mg(OH)_2$ และ $Ca(OH)_2$ ปรับ pH ที่ 12 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง สามารถเพิ่มค่าความสามารถของซีโอดีละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 39.8, 36.6, 10.8 และ 15.3 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.6 สำหรับงานวิจัยของ Chiu et al. (1997) ได้ศึกษาการนำ NaOH ที่ความเข้มข้น 40 meq/L ความเข้มข้นของตะกอน 1%TS เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ช่วยเพิ่มค่าความสามารถของซีโอดีละลายน้ำได้ 36.83%

2.2.5.1 การไฮโดรไลซิสแป้งด้วยด่าง

ปฏิกิริยาของด่างที่เกิดกับพอลิแซ็กคาไรด์ ถูกนำเสนอโดยการทดลองของ Whistler et al. (1958) โดยการทดลองครอบคลุมถึงปฏิกิริยาของอัลคาไลด์ต่อปลายหมูรีดิวซิงค์ (reducing end-unit) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เพื่อศึกษาผลที่มีต่อพันธะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และใช้เทคนิคการย่อยสลายด้วยด่างเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิแซ็กคาไรด์รวมถึงวิเคราะห์พันธะกิ่งก้าน (branching) ที่มาเชื่อมต่อด้วย โดยปกติการย่อยสลายนั้นคือ กระบวนการ peeling (peeling process) คือกระบวนการตัดพันธะกิ่งก้านสาขาของสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์ออก โดย glycosyloxy-anion elimination ซึ่งเริ่มที่หมูรีดิวซิงค์และค่อยๆไปทำปฏิกิริยาไปตลอดสายโซ่เพื่อปลดปล่อยโมเลกุลของแซคคาริเนต (saccharinate) ที่มาเชื่อมต่อเป็นพันธะกิ่งก้าน (branch) ออก โดยในการไฮโดรไลซิสแป้งด้วยสภาวะด่างทำได้ทั้งสภาวะที่ไร้ออกซิเจน และสภาวะที่ใช้ออกซิเจน (Bemiller, 1965) ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. การไฮโดรไลซิสด้วยด่างที่สภาวะไร้ออกซิเจน

จากการทดลองของ Bemiller (1965) ได้ทำการไฮโดรไลซิสอะมิโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยความเข้มข้นเท่ากับ N อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลา 20 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ได้แก่ “ α,β ”-D-isosaccharinate ประมาณ 23%, ฟอर्मेट (Formate) ประมาณ 35%, แลคเตท (Lactate) ประมาณ 6% สำหรับกลไกที่ทำให้เกิด D-isosaccharinate จากอะมิโลส คือปฏิกิริยา normal beta elimination และตามด้วยปฏิกิริยา benzilic acid type rearrangement หรือเรียกกลไกนี้ว่า “beta-alkoxy carbonyl” สำหรับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับแป้งและให้ความร้อนไปด้วยจะก่อให้เกิดกรดเกลือที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนน้อยกว่า 6 อะตอมแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ผลผลิตภัณฑ์กรดที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอะไมโลสและมอลโทสด้วยสารต่าง

สภาวะ	ผลิตภัณฑ์ (% ของกรด)				
	D-Isosaccharinic	Formic	Lactic	Glycolic	2-Deoxy-D-tetronolactone ^a
Amylose					
0.04 N Ca(OH) ₂ at 100°C	73	12	3	b	b
0.5 N NaOH at 100°C	24	35	6	b	b
Maltose					
0.04 N Ca(OH) ₂ at 25°C	89	2	0	0	0
0.05 N NaOH at 25°C	13	11	0	23	33

^a Yield of free acid was not determined

^b Yield was not determined

จากการทดลองของ Stacy et al. (1956) ทำการไฮโดรไลซิสอะไมโลเพกตินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยอุณหภูมิห้องและระยะเวลา 54 วัน โดยโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีความไวต่อการย่อยสลายด้วยด่างโดยกระบวนการ peeling (กระบวนการตัดกิ่งก้านสาขาของโครงสร้างแป้งออก) เริ่มที่หมู่ปลายรีดิวซ์ (reducing end) และจะทำการตัดออกทีละชั้นบนสายโซ่หลัก นั่นก็คือ (1→4)-linked Diglucopyranose ซึ่งเป็นผลผลิตของโมเลกุล D-isosaccharinate ที่มียึดติดแบบพันธะกิ่ง เป็นที่รู้กันดีว่า อะไมโลเพกติน เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า alkali-stable เนื่องจากโมเลกุลมีความไวในการสลายตัวและเกิดผลิตภัณฑ์กรดน้อย

2. การไฮโดรไลซิสด้วยด่างที่สภาวะใช้ออกซิเจน

การย่อยสลายในส่วนนี้อาจเป็นไปได้ว่าผลที่เกิดขึ้นของกระบวนการออกซิเดชันเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยา beta elimination แป้งที่มีกลุ่มไดอัลดีไฮด์ (dialdehyde) จะเกิดปฏิกิริยา ดีพอลิเมอร์ไรส์ (depolymerizes) อย่างรวดเร็วในสารละลายด่าง โดยกระบวนการหลักคือ beta-elimination ที่ตำแหน่ง C-5 ผลผลิตที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 2.6 แม้ว่า จะมีไอออนของแคลเซียมผสมอยู่ด้วยในการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตด้วยสภาวะต่าง เนื่องจากเป็นตัวเร่งเฉพาะการจัดเรียงตัวใหม่ของ benzoic acid-type และ โครงสร้างของกรดแซคคารินิก (saccharinic acid)

ตารางที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส Periodate-oxidized Starch

ผลิตภัณฑ์	ผลผลิต ^{a,b}			
	A	B	C	D
Neutral products	0.32	0.11	0.25	0.1
Total acid	0.63	2.15	0.84	1.8
Volatile acids	0.1	0.39	0.09	0.22
Formic acid	0.08	0.35	0.05	0.2
Glycolic acid	0.31	0.86	0.41	0.75
3-Deoxy-DL-tetronic acid	0.1	0.2	0.19	0.39
Unknown polymeric acid	0.2	0.1	0.2	0.1
Supposed cannizzaro reaction product	0.1	0.1	0.1	0.1

^a Yield of products in equivalents per mole of oxidized D-glucose unit except those marked with asterisk where yields are expressed in grams of periodate-oxidized starch.

^b A, Saturated lime water for 30 min; B, saturated lime water for 40 days ; C, N sodium hydroxide for 30 min; D, N sodium hydroxide for about 5 months. All at room temperature.

2.2.5.2 การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยด่าง

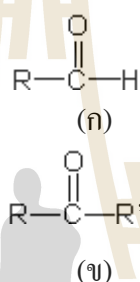
สำหรับการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยด่าง จะต้องประกอบหลักของผลผลิตที่ได้สามารถตรวจพบได้ในช่วงของอุณหภูมิ 20 - 200 °C สิ่งหลักที่สังเกตได้คือ การเปลี่ยนแปลงสภาวะการย่อยสลายมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้

ในกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสโดยใช้สารละลายด่างที่อุณหภูมิ 100°C จะตรวจพบสารผลิตภัณฑ์จำพวกเกลือของกรดมากกว่า 50 ชนิดแต่กลับมีความเข้มข้นต่ำน้อยกว่า 1% และเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 170 - 190 °C จะตรวจพบผลิตภัณฑ์หลักคือ Straight-chain และ Branch-chain hydroxyl-monocarboxylic และ dicarboxylic acid และที่อุณหภูมิสูงประมาณ 280 °C จะตรวจพบ methanoic (formic), ethanoic (acetic), hydroxyethanoic (glycolic) และ 2-hydroxypropanoic (lactic) acid (Knill et al., 2003)

2.3 การย่อยสลายกากมันต่ำปะหลัง

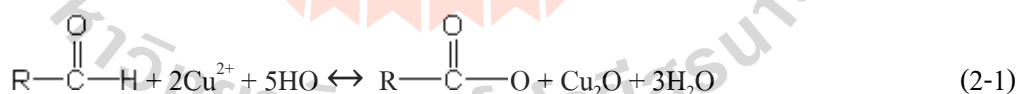
2.3.1 ผลของน้ำตาลรีดิวิซ์

น้ำตาลรีดิวิซ์คือน้ำตาลที่ประกอบไปด้วยหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde) หรือหมู่คีโตน (ketone) มีสูตรโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งน้ำตาลรีดิวิซ์ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (glucose) ฟรุคโตส (fructose) กลีเซอรอลดีไฮด์ (glyceraldehyde) แล็กโทส (lactose) อะราบิโนส (arabinose) เพนโทส (pentoses) และมอลโทส (maltose) รวมทั้งน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ทุกชนิดที่ประกอบด้วยหมู่คีโตน (ketone) หรือที่เรียกว่า คีโตน (ketoses) และหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde) หรือที่เรียกว่าแอลโดส (aldoses) ยกเว้นน้ำตาลซูโครส (sucrose)



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของ (ก) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และ (ข) คีโตน (ketone)

การทดสอบน้ำตาลรีดิวิซ์สามารถทดสอบด้วย benedict's reagent และ สารละลาย fehling's ซึ่งสารทั้งสองชนิดประกอบด้วยคอปเปอร์ (II) ไอออน ซึ่งเมื่อสารละลายได้รับความร้อน จะเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์ (I) ออกไซด์และสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว ส้ม หรือแสดงดังแสดงในสมการที่ (2-1)



น้ำตาลรีดิวิซ์จัดว่าเป็นคาร์โบไฮเดรต หรือแซคคาไรด์ (saccharide) โดยคาร์โบไฮเดรต สามารถแบ่งตามลักษณะโมเลกุลได้ดังนี้

2.3.1.1 มอนอแซคคาไรด์ (monosaccharide) หรือน้ำตาลชนิดง่าย

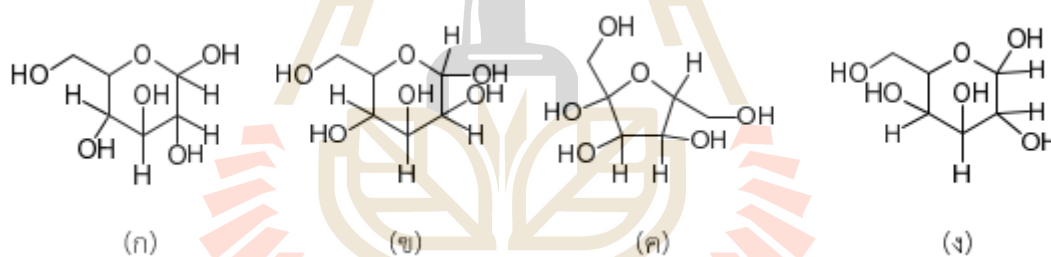
ประกอบด้วยพอลิไฮดรอกซีแอลดีไฮด์หรือคีโตน เพียงหนึ่งหน่วยเช่น น้ำตาลกลูโคส แมนโนส ฟรุคโตสและกาแล็กโทส

ดีกลูโคสเป็นมอนอแซคคาไรด์ที่พบมากที่สุดชนิดในธรรมชาติ เช่น ในผลไม้ การย่อยสลายแป้งเป็นพลังงานของเซลล์สิ่งมีชีวิตและเป็นหน่วยสร้างไดแซคคาไรด์หลายชนิด อีกทั้งยังเป็นตัวนำไปสู่การสังเคราะห์มอนอแซคคาไรด์ชนิดอื่นอีกด้วยกลูโคสมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 ก

แมนโนสเป็นน้ำตาลที่ได้จากการสลายแมนแนน (mannan) หรือจากผลไม้จากพืช ทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบของสารกลุ่มไกลโคโปรตีน แมนโนสมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 ข

ฟรุกโตส เป็นน้ำตาลที่มีความหวานที่สุด พบในน้ำผลไม้ น้ำผึ้ง การย่อยสลายน้ำตาลอ้อย และอินูลินซึ่งสกัดได้จากต้นอาร์ทิโชก (artichoke) น้ำตาลฟรุกโตส มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 ค

กาแล็กโทส ได้จากการสลายน้ำตาลแล็กโทสจากนม กาแล็กโทสเป็นส่วนประกอบของ สารกลุ่มไกลโคลิพิด และไกลโคโปรตีน กาแล็กโทสมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของ (ก) กลูโคส (ข) แมนโนส (ค) ฟรุกโตส (ง) กาแล็กโทส

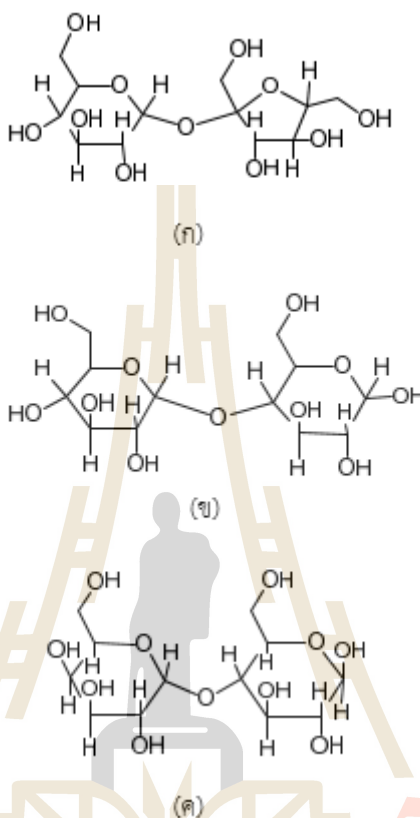
2.3.1.2 โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide)

ประกอบด้วยมอนอแซคคาไรด์ตั้งแต่ 2-10 หน่วย ต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) โอลิโกแซคคาไรด์ได้แก่ น้ำตาลซูโครส มอลโทส และแล็กโทส

ซูโครสเป็นไดแซคคาไรด์ ที่ประกอบไปด้วยแอลฟา-ดี-กลูโคส และเบตา-ดี-ฟรุกโตส ต่อกันด้วยพันธะ $\alpha 1 \rightarrow \beta 2$ ซูโครสมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.10 ก

มอลโทสเป็นไดแซคคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยกลูโคส 2 หน่วยต่อกันด้วยพันธะ $\alpha 1 \rightarrow 4$ มอลโทสมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.10 ข

แล็กโทสเป็นน้ำตาลที่พบเฉพาะในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมประกอบด้วยกาแล็กโทส และกลูโคสต่อกันด้วยพันธะ $\beta 1 \rightarrow 4$ แล็กโทสมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.10 ค



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของ (ก) ซูโครส (ข) มอลโทส (ค) แล็กโทส

2.3.1.3 พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide)

ประกอบด้วยน้ำตาลมอโนแซคคาไรด์หรืออนุพันธ์ของพอลิแซคคาไรด์ตั้งแต่ 10 หน่วยขึ้นไป ต่อกันเป็นโซ่ตรงหรือกิ่งซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือโฮโมพอลิแซคคาไรด์ (homopolysaccharides) และเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (heteropolysaccharides)

โฮโมพอลิแซคคาไรด์ เมื่อถูกสลายตัวด้วยน้ำจะได้มอโนแซคคาไรด์เพียงชนิดเดียว โฮโมพอลิแซคคาไรด์ ชนิดนี้ เช่น เซลลูโลส และแป้ง

เฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ เมื่อถูกสลายตัวด้วยน้ำจะได้มอโนแซคคาไรด์มากกว่าหนึ่งชนิด เฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ ชนิดนี้ เช่น กรดไฮยาลูโรนิก (hyaluronic acid) เฮพาริน (heparin) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

กิตติกานท์ สุขวานิชย์ (2554) ได้ทำการศึกษา เปรียบเทียบประสิทธิภาพ การผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยสารกรดและด่างในครั้งนี้ ได้ แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการหาปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิส ซึ่งทำโดยแผนการ ทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ปัจจัยที่เลือกศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ และเวลาที่ ใช้ในการทำปฏิกิริยา ส่วนดัชนีที่ใช้ในการประเมินได้แก่ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และกรดไขมัน ระเหยง่าย ส่วนที่ 2 เป็นการหาผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และกรดไขมันระเหยง่ายที่มีต่อ ประสิทธิภาพในการผลิตไบโอแก๊ส โดยเลือกสภาวะการไฮโดรไลซิสที่ทำให้เกิดปริมาณน้ำตาล รีดิวซ์ และกรดไขมันระเหยง่ายมากที่สุดต่างกัน 6 สภาวะจากผลการทดลองส่วนแรก เพื่อนำมาใช้ ในการเดินระบบหมักกากมัน โดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการแบบทีละเท ผลจากการศึกษา พบว่า พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมรรถนะการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยสารกรด และสารด่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาล รีดิวซ์ และกรดไขมันระเหยง่าย คือ การไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ค่า pH 0 อุณหภูมิ 100 °C และ เวลา ในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายเท่ากับ 855 และ 60.3 mg/g Dry weight ตามลำดับ โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายถึง 214 และ 20 เท่า จากระดับเริ่มต้น ในส่วนของการไฮโดรไลซิสด้วยด่างพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ สูงสุดมีค่าต่ำกว่าของการไฮโดรไลซิสด้วยกรดอย่างมาก สำหรับการผลิตไบโอแก๊สพบว่า การ ไฮโดรไลซิสกากมันด้วยสารด่างที่ pH 13 อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 90 นาที ก่อนนำไปหมักแก๊ส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สได้อย่างเด่นชัด โดยปริมาณแก๊สสะสมภายหลังการ หมัก 30 วัน มีค่าเท่ากับ 1.2 m³/kg TS หรือ 0.19 1.2 m³/kg wet weight ซึ่งมากกว่ากรณีการใช้กากที่ ไม่ผ่านการไฮโดรไลซิสถึง 3 เท่า ซึ่งในส่วนของ การไฮโดรไลซิสกากมันด้วยกรดที่ให้ปริมาณ น้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายสูงสุดนั้น กลับให้แก๊สในปริมาณต่ำโดยมีค่าต่ำกว่าของกรณี การใช้กากมันที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซิส

พิชชา สวดยสม และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของการ ผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง โดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการแบบเดินระบบไม่ ต่อเนื่อง โดยได้ทำการหาของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบโดยทำการแปรผัน ของกากมัน คือ 2,3,5 และ 10% น้ำหนักต่อน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเพิ่ม ประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สด้วยการให้ความร้อนกับกากมันหรือการใช้เอนไซม์เซลลูเลสและ เอนไซม์เพคตินเนส ก่อนการหมักด้วย ผลการศึกษาพบว่าของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับ การเดินระบบ คือ 2 - 3 % ซึ่งให้อัตราการผลิตแก๊สคือ 0.034 - 0.047 m³/kg wet weight การให้ความ ร้อนกับส่วนผสมกากมันสำปะหลัง 2% ที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 120 °C นาน 30 นาทีผลการศึกษา

พบว่าทำให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส แต่กลับมีผลทำให้เกิดไบโอแก๊สน้อย โดยปริมาณไบโอแก๊สที่ผลิตได้ต่อกิโลกรัมของกากเปียกคดลงอยู่ในช่วง 0.033 - 0.039 m³ และในการหมักย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเนสในปริมาณ 5 - 20 NCU/g และ 50 - 125 PUG/g TS ตามลำดับ ที่ pH 4.5 ด้วยระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนนำมาหมัก ไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนกากมันสำปะหลังเป็นไบโอแก๊สได้เช่นเดียวกับการให้ความร้อนก่อนการหมัก อย่างไรก็ตามการใช้เอนไซม์เพคตินเนสที่ปริมาณ 125 PUG/g TS และเอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 NCU/g TS สามารถผลิตไบโอแก๊สได้สูงสุดเมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์เซลลูเลสในปริมาณที่ต่ำกว่าและเมื่อทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 NCU/g TS เอนไซม์เพคตินเนสในปริมาณ 50,80 และ 125 PUG/g TS พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตไบโอแก๊สไม่มีความแตกต่างกัน และไม่แตกต่างไปจากกรณีที่ใช้เอนไซม์เพคตินเนสที่ปริมาณ 125 PUG/g TS อย่างมีนัยสำคัญด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดของเวลา การศึกษานี้ได้ทำการทดลองการเอนไซม์ที่ค่าพีเอชค่าเดียวคือ pH 4.5 และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 30 นาที ซึ่งอาจจะไม่ใช่สถานะที่เหมาะสมของการทำงานของเอนไซม์

ธีรภัทร ศรีนรคุตร และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษากการย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในประเทศไทย ซึ่งสามารถทำได้โดยการผ่านขั้นตอนการ pretreatment โดยการไฮโดรไลซ์โดยการใช้อครดหรือเอนไซม์ เพื่อเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาลในการศึกษาการไฮโดรไลซ์จะใช้อครดซัลฟูริกเข้มข้น 0.6 M ที่อุณหภูมิ 120 °C อัตราส่วนมันสำปะหลังต่อกรดเท่ากับ 1:2 จะได้น้ำตาลรีดิวิซ์สูงสุด 6.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในขณะที่การใช้วิธีไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ผสม พบว่าการใช้เอนไซม์ ผสมระหว่างเซลลูโลสและเพคตินเนส ที่อุณหภูมิ 28 °C และค่า pH 4.5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ย่อยที่อุณหภูมิ 100 °C และค่า pH 5.5 เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเอนไซม์ กลูโคอะไมเลส ที่อุณหภูมิ 60 °C และค่า pH 4.5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้น้ำตาลรีดิวิซ์ 6.2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และการนำน้ำตาลที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ 8.92 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไปหมักกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR5596 ในถังหมัก *Saccharomyces cerevisiae* ขนาด 10 L จะได้ปริมาณเอทานอลสูงสุด 3.62 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในชั่วโมงที่ 24 คิดเป็นประสิทธิภาพการหมัก 91%

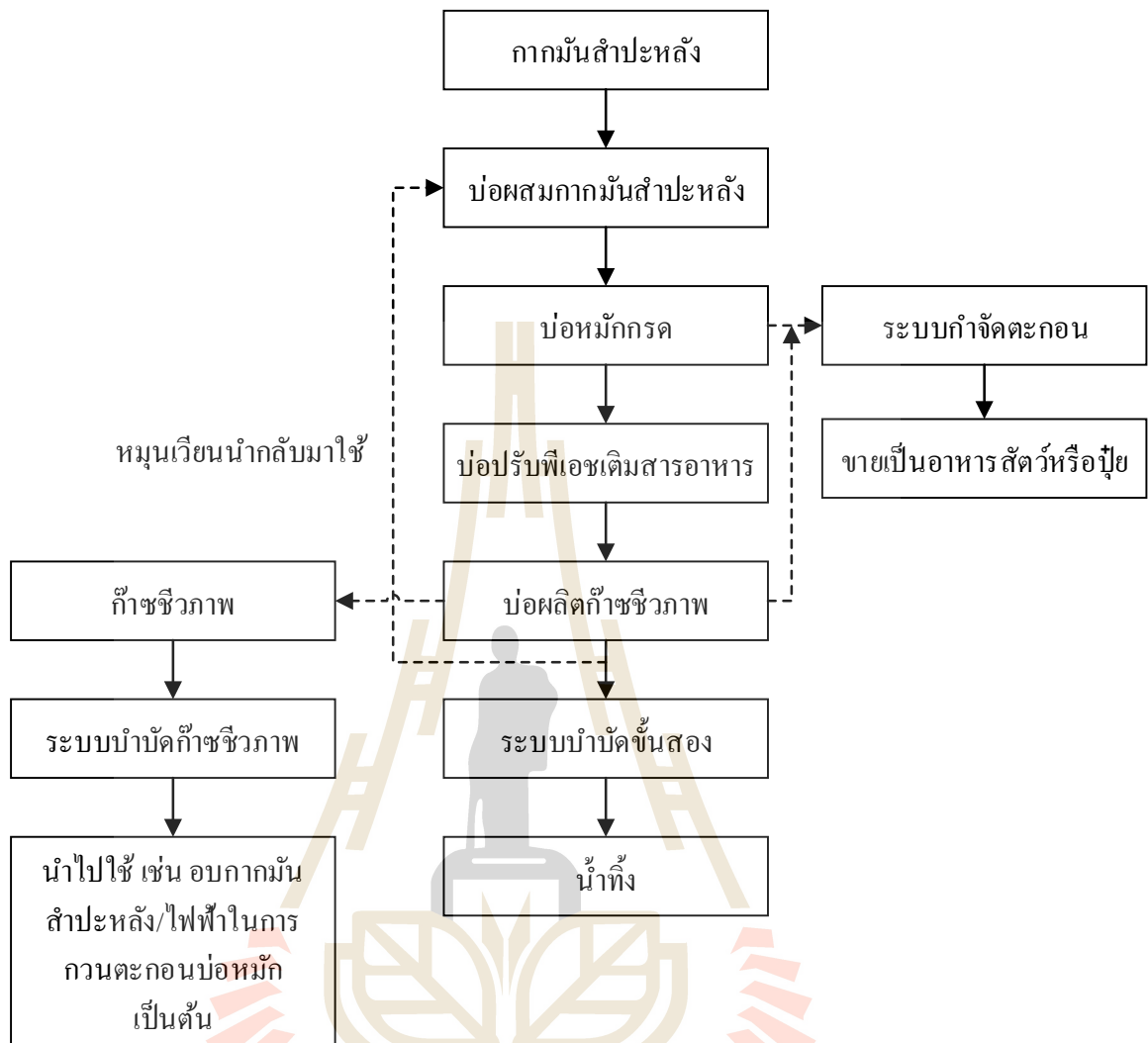
Tasic et al. (2009) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแป้งจากหัวมันฝรั่งบดโดยการใช้อครดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก ที่อัตราส่วนระหว่างหัวมันฝรั่งบดต่อสารละลายกรดแตกต่างกัน อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองคือ 1:0.75 (w/v), 1:1 (w/v) และ 1:2 (w/v) โดยสารละลายกรดทั้งสองชนิดมีความเข้มข้น 1 M และ 2 M ขั้นตอนการศึกษาคือ นำหัวมันฝรั่ง

บดผสมกับสารละลายกรดให้ปริมาตร 200 ml ให้ความร้อนจนกระทั่งเดือดประมาณ 60 นาที และทำการวิเคราะห์หาค่าน้ำตาลรีดิวซ์, Dextrose Equivalent (DE), Reaction rate Constant และ 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) พบว่าความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันฝรั่ง แต่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายกรดและอัตราส่วนของหัวมันฝรั่งบดต่อปริมาณสารละลายกรด สำหรับค่า Dextrose Equivalent ที่พบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 94% และมีค่า Reaction rate Constant สูงสุดเท่ากับ 0.089 min^{-1} ส่วนค่า 5-HMF เท่ากับ 0.04 g/L ซึ่งได้จากการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 M และอัตราส่วนหัวมันฝรั่งบดต่อสารละลายกรดเท่ากับ 1:2 (w/v) สำหรับผลของเอทานอลที่ได้เท่ากับ 31 g/L ได้จากการหมักสารละลายมันฝรั่งบดกับสารละลายกรดภายใต้สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้สเตรปโตคอกคัส 28 °C 18 ชั่วโมง

2.3.2 การผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลัง 1 ตัน (น้ำหนักเปียก) สามารถผลิตไบโอแก๊ส (มีเทน 60 - 65 โดยปริมาตร) ได้ประมาณ $0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$ นำไปใช้ในการอบกากมันสำปะหลัง หรือผลิตกระแสไฟฟ้า ตะกอนที่ถูกหมักย่อยโดยสมบูรณ์แล้ว สามารถนำไปตากให้แห้งแล้วขายเป็นปุ๋ยอินทรีย์ ในช่วงฤดูฝน สามารถลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็น และลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551) การเปลี่ยนกากมันสำปะหลังเป็นไบโอแก๊ส แสดงดังรูปที่ 2.11





รูปที่ 2.11 ผังแสดงระบบการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง

2.3.2.1 ขั้นตอนการผลิตไบโอแก๊ส

ไบโอแก๊ส คือ แก๊สที่เกิด จากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ องค์ประกอบของไบโอแก๊สได้แก่ แก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณ 60 - 70% และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 28 - 38% ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สชนิดอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ออกซิเจน (O_2) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551)

ไบโอแก๊ส เกิดจากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เพื่อใช้เป็นสารอาหารในการดำรงชีพของแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน การย่อยสลายสารอินทรีย์อาศัยการทำงานที่สัมพันธ์กันของแบคทีเรีย 4 กลุ่ม (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551) ดังต่อไปนี้

1. Hydrolytic bacteria แบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนกลุ่มนี้จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน เซลลูโลส ลิกนิน และไขมัน ไปเป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน กลูโคส และกลีเซอรอล

2. Fermentative acidogenic bacteria หรือ acid forming bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้จะย่อยสลายน้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันไปเป็นกรดอินทรีย์ (เมทานอล เอทานอล กลีเซอรอล และอะซิโตน) อะซิเตท แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน

3. Acetogenic bacteria หรือ Acetate- H_2 producing bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะซิเตท แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการสภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจน (H_2 Partial Pressure) ต่ำในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่าย

4. Methanogenic bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้จะย่อยสลายอะซิเตทและแก๊สไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก็คือ ไบโอดีแก๊ส

2.3.2.2 ขั้นตอนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นไบโอดีแก๊ส

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะแอนแอโรบิกเป็นการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นไบโอดีแก๊ส (Biogas) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยมีขั้นตอนการย่อยสลายกากมันสำปะหลังแบบแอนแอโรบิกดังรูป 2.13 และมีรายละเอียด 4 ขั้นตอนดังนี้

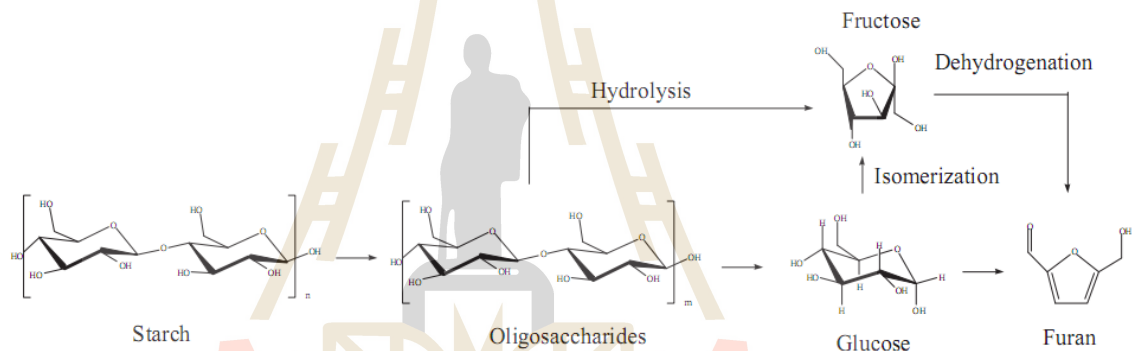
1. ขั้นตอนการสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลง เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก

2. ขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) โดยจุลินทรีย์กลุ่ม Fermentative bacteria หรือ Acid forming bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียสร้างกรดที่ทำหน้าที่ในการดูดซึมสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้จากการไฮโดรไลซิสในขั้นที่ 1 เข้าสู่เซลล์ เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการผลิตพวกกรดระเหยง่ายที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้น เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) กรดบิวไทริก (Butyric acid) เป็นต้น นอกจากนี้ ในระหว่างกระบวนการทางชีวภาพเคมีของการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กนี้ แบคทีเรียสร้างกรดจะผลิตไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย

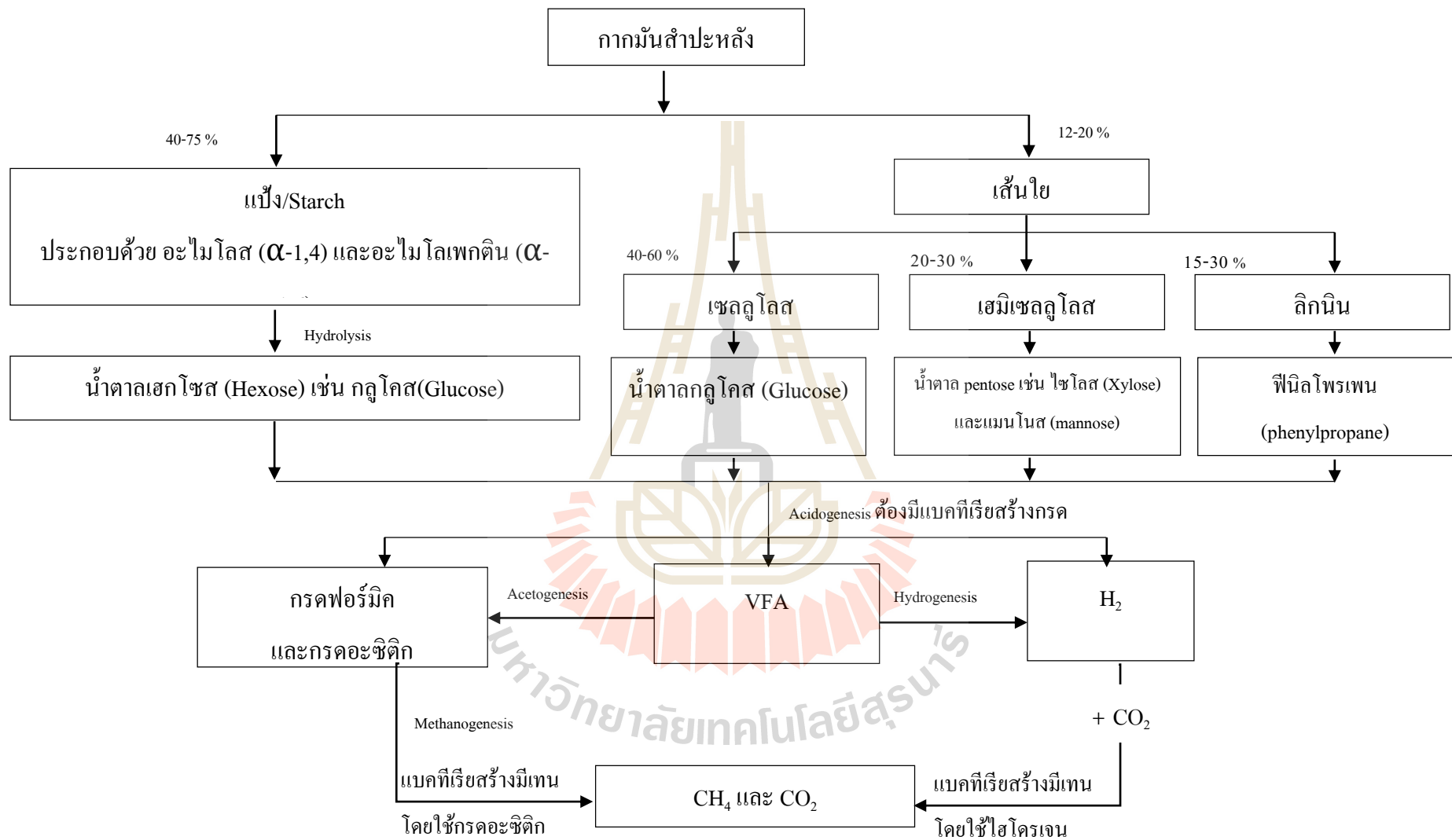
3. ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นกรดอะซิติก (Acetogenesis) โดยแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic) จะทำการย่อยสลายกรดระเหยที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่หรือ

มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม และสารประกอบที่เป็นกลางซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเมธานอล ได้แก่ แอลกอฮอล์ กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก กรดไอโซบิวไทริก (Isobutyric acid) กรดแล็กติก (Lactic acid) เป็นต้น ให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยแบคทีเรียกลุ่ม Homogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มของ Facultative bacteria

4. ขั้นตอนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยน กรดอะซิติกให้กลายเป็นมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่ม Methanogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนหรือออกซิเจนอิสระ (Strictly anaerobic bacteria) โดยจะสามารถเจริญเติบโตได้ดีและเปลี่ยนกรดอะซิติกไปเป็นมีเทนได้ในสภาวะไร้อากาศเท่านั้น ดังนั้น ในขั้นตอนนี้กรดอะซิติกและไฮโดรเจนที่ได้จากการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระยะเห่ง่ายจะถูก Methanogenic bacteria นำไปใช้ในการสร้างมีเทนภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก



รูปที่ 2.12 เส้นทางการย่อยสลายไขมันสำปะหลังไปเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (Li et al., 2015)



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการย่อยสลายกากมันสำปะหลังทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก (ชงชาติ สุริยวงศ์, 2556)

ตารางที่ 2.6 สรุปการศึกษางานวิจัยการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่สามารถสรุปดังตารางต่อไปนี้

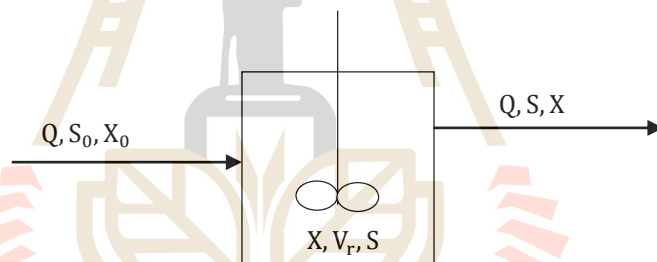
สารตั้งต้นที่ใช้	วิธีดำเนินงาน	Biogas yield ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{VS}$)	ความสามารถในการผลิต ไบโอแก๊ส (m^3/day)	เอกสารอ้างอิง
กากมันสำปะหลังผสมน้ำขี้หมู	Semi continuously stirred reactor with total volume of 10 L and working volume of 7 L ; 60 days	0.67	0.0422	Glanpracha and Annachhatre , (2016)
กากมันสำปะหลังผสมกากตะกอน	Both batch and semi-continuous anaerobic digestion mesophilic and Thermophilic	0.333 mesophilic and 0.395 Thermophilic	0.0043 mesophilic and 0.0051 Thermophilic	Zhang et al. (2014)
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังผสมมูลวัว	Anaerobic fixed bed polyethylene bioreactor	1.23	0.32	Bond et al. (2011)
กากมันสำปะหลังผสมน้ำหมักกรด	Batch bioreactor; thermophilic	0.259	0.0055	Zhang et al. (2011)
กากมันสำปะหลังผสมน้ำขี้หมู	CSTR ; two-phase system ; mesophilic; substrate ratio=60:40	0.350	0.0110	Panichnumsin et al. (2010)
กากมันสำปะหลังผสมน้ำหมักกรด	Batch 6 L; two-phase digesters; Thermophilic ; 30 days	$1.2 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{TS}$	0.1247	กิตติกานต์ สุขวานิชย์ (2554)
หัวมันสำปะหลังผสมมูลวัวและน้ำขี้โคลน	Continuous two-phase digesters; 6 L acid tank; 21 L methane tank; mesophilic	0.6789	0.0697	Lansing et al. (2010)

2.3.4 กลไกการเกิดไบโอแก๊สในถังปฏิกรณ์

2.3.4.1 จลนศาสตร์ของถังปฏิกรณ์กวนผสม

การสร้างสมการเพื่อใช้ในทางวิเคราะห์ และออกแบบถังบำบัดน้ำเสีย จำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับปฏิกิริยาชีวเคมี และความรู้ทางจลนศาสตร์ประกอบกัน จุดประสงค์เพื่ออธิบายถึงการพัฒนาเพื่อรักษาสมดุลของจุลินทรีย์และสารอาหารในระบบ และการทำนายความเข้มข้นของจุลินทรีย์กับสารอาหารที่ออกจากระบบ โดยใช้สมการสมดุลของมวลสาร (mass balance equation) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญของจุลินทรีย์กับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังสมการที่ 2.2 ภายใต้ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบ Monod Reaction (Metcalf and Eddy, 2004) โดยที่ในถังปฏิกรณ์กวนผสมจะมีน้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ผสมกันดีทั่วทั้งถังตลอดเวลา โดยน้ำที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์จะมีลักษณะเหมือนกับน้ำที่อยู่ในถังปฏิกรณ์มีการไหลเข้าออกแบบต่อเนื่องสม่ำเสมอ และไม่มีการไหลวนกลับ ดังแสดงในรูปที่ (2.14)

$$\frac{1}{\theta_c} = \mu_{\max} \left(\frac{S_1}{K_S + S_1} \right) - k_d \quad (2-2)$$



รูปที่ 2.14 ถังปฏิกรณ์กวนผสม

ถ้าระบบบำบัดน้ำเสียอยู่ในสภาวะคงที่ จะได้สมการที่ (2-3) และ (2-4) (Renolds and Richards, 1991)

$$X_1 = \frac{\mu_{\max}(S_1 - S_1)}{k(1 + k_d \theta_c)} = \frac{Y(S_1 - S_1)}{(1 + k_d \theta_c)} \quad (2-3)$$

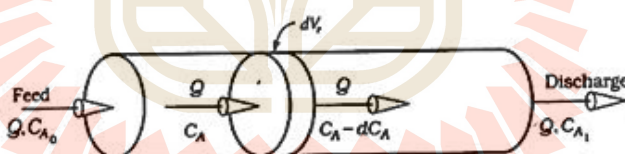
$$S_1 = \frac{K_S(1 + \theta_c k_d)}{\theta_c(\mu_{\max} - k_d) - 1} \quad (2-4)$$

เมื่อ μ_{\max} = อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (ต่อเวลา)
 S_1 = ความเข้มข้นของสารอาหารในถังปฏิกรณ์ (น้ำหนักต่อปริมาตร)
 K_S = ความเข้มข้นของสารอาหาร ณ จุดที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ

		ครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด (น้ำหนักต่อปริมาตร)
k_d	=	สัมประสิทธิ์การสลายตัวของจุลินทรีย์ (ต่อเวลา)
S_i	=	ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (น้ำหนักต่อปริมาตร)
θ_c	=	เวลาเก็บกัก (เวลา)
X_1	=	ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ (น้ำหนักต่อปริมาตร)
k	=	อัตราการใช้สารอาหารสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยจุลินทรีย์
Y	=	สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตสูงสุดของจุลินทรีย์ (น้ำหนักต่อน้ำหนัก)

2.3.4.2 จลนศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ไหลตามกัน (Plug-flow reactor, PF)

ถังปฏิกรณ์ไหลตามกันหรือถังปฏิกรณ์ทิวบูลาร์ซึ่งมีลักษณะไหลในเส้นท่อหรือตามแนวยาวของถัง นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียต่างๆ ซึ่งปัจจุบันถังปฏิกรณ์ไหลตามกันได้ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ถังเติมอากาศ ถังฆ่าเชื้อโรคโดยวิธีเติมคลอรีน บ่อบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ เป็นต้น จากสมมติฐานของถังปฏิกรณ์ไหลตามกันและเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามความยาวของถังหรือเส้นท่อปฏิกรณ์ ความเข้มข้นของน้ำเสียและผลิตภัณฑ์จะแปรผันตามแนวแกน x เท่านั้น ดังรูปที่ 2.15 ดังนั้นจึงเลือกปริมาณควบคุมจากปริมาณเล็กน้อยมาก ๆ ΔV ซึ่งถือได้ว่าความเข้มข้นภายในนั้นมีความสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.15 ถังปฏิกรณ์ไหลตามกันหรือถังปฏิกรณ์ทิวบูลาร์

สมการดุลมวลของสารอาหารรอบๆ ปริมาตรบั้งคับเขียนได้ ดังสมการที่ (2-5) ดังนั้นอาจเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2-6) และ (2-7)

$$\text{เข้า} - \text{ออก} + \text{ผลิต} = \text{สะสม} \quad (2-5)$$

$$n_A|_x - n_A|_{x+\Delta x} + r_A A_c dx = \frac{\partial}{\partial t} (A_c \Delta x C_A) \quad (2-6)$$

$$-\frac{n_A|_{x+\Delta x} - n_A|_x}{\Delta x} + r_A A_c = A_c \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2-7)$$

โดยที่	C_A	=	ความเข้มข้นของสาร A
	A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกรณ์
	x	=	ระยะจากทางเข้าของถังปฏิกรณ์
	Δx	=	ความยาวของปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรน้อยยิ่ง
	$n_A _x, n_A _{x+\Delta x}$	=	อัตราไหลของโมลของ A ที่ระยะ x และ $x + \Delta x$ จากทางเข้าของถังปฏิกรณ์
	r_A	=	อัตราการผลิตของสาร A

เมื่อขีดจำกัด Δx เข้าใกล้ศูนย์ จะได้สมการที่ (2-8)

$$-\frac{\partial n_A}{\partial t} + r_A A_c = A_c \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (2-8)$$

ในกรณีที่อยู่ในสภาวะคงที่ ความเข้มข้นที่จุดใดๆ ในถังปฏิกรณ์จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คือ $\partial C_A / \partial t = 0$ จะได้สมการที่ (2-9)

$$-\frac{\partial n_A}{\partial t} + r_A A_c = 0 \quad (2-9)$$

อัตราไหลของโมลหาได้จากผลคูณของอัตราการไหลและความเข้มข้นของโมล ดังสมการที่ (2-10)

$$n_A = F C_A \quad (2-10)$$

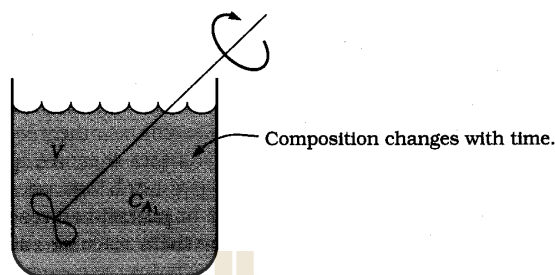
สารละลายในน้ำ อัตราไหลอาจสมมติใหม่ค่าคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงกับระยะทางตามแนวแกน ดังนั้นสมการที่ (2-11) จะลดเหลือดังสมการที่ (2-12)

$$F \frac{\partial C_A}{\partial x} + r_A A_c = 0 \quad (2-11)$$

$$\text{หรือ } r_A = -\frac{F}{A_c} \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (2-12)$$

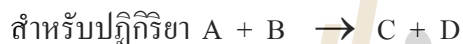
ตามทฤษฎีแล้วอัตราการทำปฏิกิริยาอาจคำนวณได้ ถ้าเก็บตัวอย่างของไหลที่จุดต่างๆ ตามความยาวของถังปฏิกรณ์ได้โดยไม่รบกวนระดับความเข้มข้น

2.3.4.3 จลนศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบ Batch



รูปที่ 2.16 การทำงานของ Batch reactor ในช่วงเวลาต่างๆ

ปฏิกรณ์แบบ Batch เป็นกระบวนการไม่ใช่สภาวะคงที่ ทำงานเป็นรอบๆ



คิดเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้จากอัตราการหายไปของสาร A

เข้า - ออก + ผลิต - การย่อยสลาย = สะสม

โดยที่ เข้า = 0 ระบบกะ (Batch) ไม่มีการไหลเข้าของสาร ดังนั้น $F_{A0} = 0$
 ออก = 0 ระบบกะ (Batch) ไม่มีการไหลออกของสาร ดังนั้น $F_A = 0$
 ผลิต = 0 ไม่มีการเกิดของสาร A
 การย่อยสลาย = อัตราการหายไปของสาร A = $r_A V$
 สะสม = dN_A/dt

จะได้สมการการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor) ในกรณีที่ปริมาตรคงที่คือ

$$\frac{dN_A}{dt} = r_A V \quad (2-13)$$

สมการที่ (2-13) ใช้ในกรณีที่เป็ถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor) ปริมาตรคงที่คือ ขนาดของถังปฏิกรณ์ไม่สามารถขยายตัว สำหรับในกรณีที่ปริมาตรไม่คงที่นั่นคือ ขนาดของถังปฏิกรณ์สามารถขยายตัวได้เช่น ในกรณีที่ ปฏิกิริยาเกิดในวัฏภาคแก๊ส (Gas Phase)

$$\text{ดังนั้น จะได้ อัตราการสลายตัวของสาร } A = -\int r_A dV \quad (2-14)$$

สมการการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบกะ(Batch Reactor)ในกรณีที่ปริมาตรไม่คงที่ คือ

$$\frac{dN_A}{dt} = \int_0^V r_A dV \quad (2-15)$$

การผลิตแก๊สมีเทนที่คำนวณได้ ที่สภาวะมาตรฐาน (0 °C and 1013.25 mbar) แสดงดังสมการ (2-16)

$$V_{CH_4} = \left(\frac{\Delta P \times V_U \times T_{std}}{T_{test} \times P_{std}} \right) \times \%CH_4 \quad (2-16)$$

ตารางที่ 2.7 แสดงการจำแนกและลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์

การทำงาน (Operation)	ลักษณะการทำงาน	ชนิดถังปฏิกรณ์	ข้อดีและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม
แบบกะ (Batch) หรือไม่ต่อเนื่อง	สารตั้งต้นทั้งหมดถูกป้อนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ แล้วจึงเริ่มทำปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนด จึงนำของผสม(สารตั้งต้นที่เหลืออยู่และผลิตภัณฑ์) ออกจากถังปฏิกรณ์	Batch	-มีโครงสร้างง่าย ๆ -กำลังการผลิตต่ำ -เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น การหมัก อุตสาหกรรมผสมสี
แบบไหลต่อเนื่อง (Flow or Continuous)	สารทำปฏิกิริยาป้อนเข้าที่ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกมาที่ทางออก	CSTR PFR	-ได้ผลผลิตอย่างต่อเนื่อง กำลังการผลิตสูง -เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น การผลิตพลาสติก
แบบเฟดแบทช์ (Fed-batch or semi-batch)	สารทำปฏิกิริยาตัวหนึ่งป้อนให้เข้าไปอยู่ในถังปฏิกรณ์ก่อน แล้วจึงป้อนสารทำปฏิกิริยาอีกตัวหนึ่ง เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง หรือป้อนเป็นระยะๆ	Batch	-ควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ง่าย -รักษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นตัวหนึ่งให้มีค่าสูงตลอดเวลาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น

2.3.4.4 ร้อยละของการสร้างกรด

ร้อยละของการสร้างกรด (% Acidification) สามารถหาได้โดยการเทียบของ VFA ที่เกิดขึ้นที่ถูกแปลงค่าเทียบเท่ากับค่าซีไอต่อค่าซีไอของน้ำเสียที่เข้าระบบ ดังสมการที่ (2-17)

$$\% \text{การสร้างกรด} = \frac{\text{COD}_{\text{acid}} \times 100}{\text{Inf.COD}_{\text{non-VFA}}} \quad (2-17)$$

เมื่อ COD_{acid} (คือ COD จาก VFA ที่เกิดในระบบ) = COD_{CH_4} ที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกริยา + $\Delta\text{COD}_{\text{VFA}}$ ของน้ำ ออกกับน้ำเข้า
 $\text{Inf.COD}_{\text{non-VFA}}$ (คือ COD เข้าระบบที่ไม่เป็น VFA) = $\text{Inf.TCOD} - \text{Inf.COD}_{\text{VFA}}$
 $\text{COD}_{\text{VFA}} = \text{VFA} \times 1.066$ กรณีที่ค่า VFA มีหน่วยเป็น mg/l เทียบกับกรดแอสติค ตามตารางที่ 2.8

COD_{CH_4} ที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกริยา = $1,000 \times \text{CH}_4 / (\text{CF} \times \text{Q})$
 เมื่อ CH_4 = ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน, ml/day
 CF = Correction Factor สำหรับคำนวณค่า COD จากแก๊สมีเทน (ที่ระดับน้ำทะเล), ml มีเทนขึ้นเทียบเท่า 1 กรัม COD (Conversion Factor (CF) สำหรับคำนวณค่า COD จากแก๊สมีเทน)
 Q = ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบต่อวัน, L/day
 $\Delta\text{COD}_{\text{VFA}}$ ของน้ำออกกับน้ำเข้า = $\text{Eff.COD}_{\text{VFA}} - \text{Inf.COD}_{\text{VFA}}$

ตารางที่ 2.8 ตัวแปลงค่ากรดระเหยง่ายเทียบค่าซีไอดี (Rosalind, 1993)

กรดระเหยง่าย	ความเข้มข้น (g COD/ g VFA)
กรดแอสติค	1.0666
กรดโพรไพออนิก	1.512
กรดบิวไทริก	1.816
กรดวาเลริก	2.037

2.3.4.5 อัตราการสร้างกรด

พารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ประเมินค่าสมรรถนะของขั้นตอนการสร้างกรดของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน คือ อัตราการสร้างกรดต่อหนึ่งหน่วยของปริมาตรของถังปฏิกรณ์ ($\text{mg}/\text{m}^3\text{-day}$)

$$r_p = \frac{\text{COD}_{\text{acid}} \times Q}{V} \quad (2-18)$$

เมื่อ	r_p	=	อัตราการสร้างกรด ($\text{mg}/\text{L}\text{-day}$)
	Q	=	ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบต่อวัน (L/day)
	V	=	ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (L)

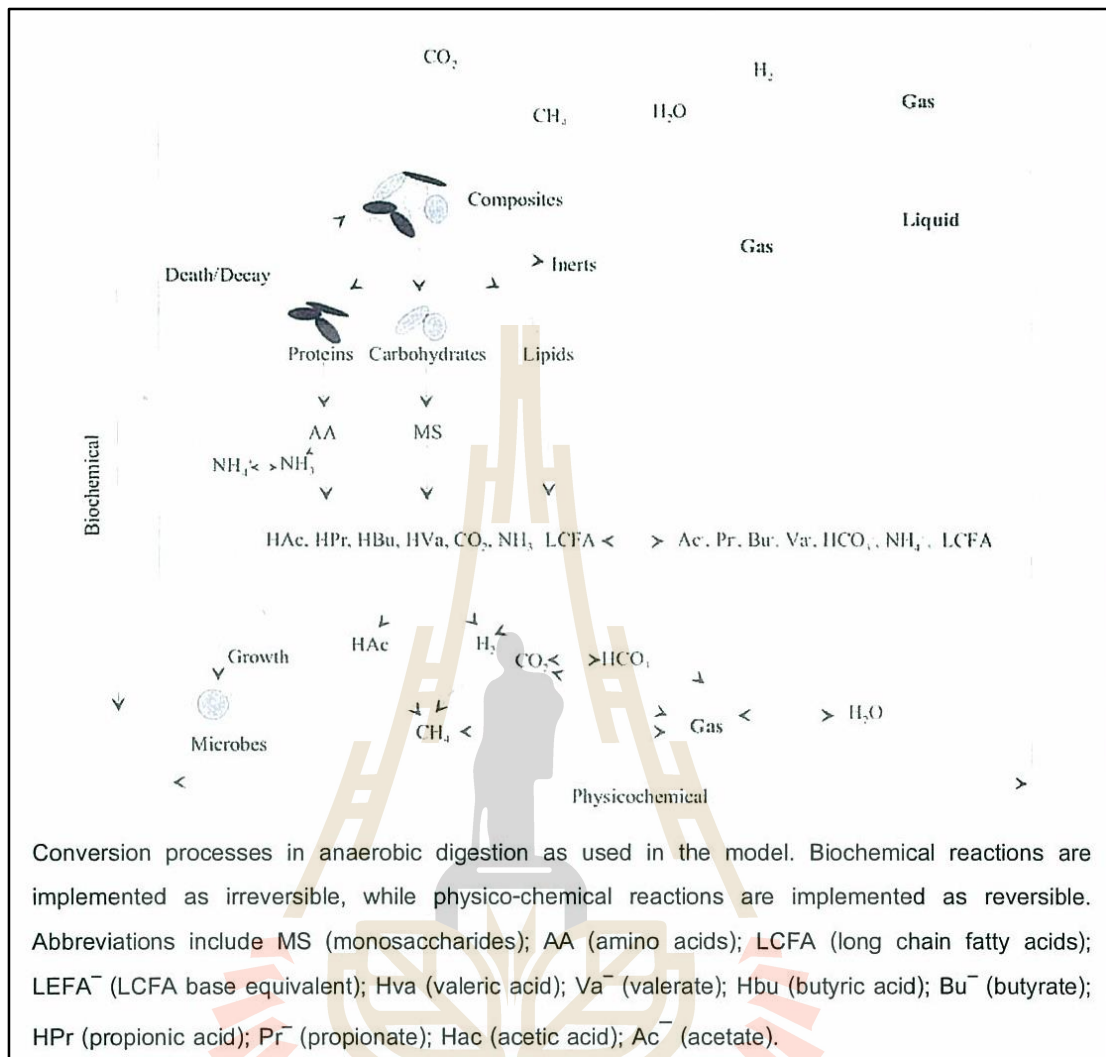
2.3.5 แบบจำลองการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนหมายเลข 1 ของ IWA (The IWA Anaerobic Digestion Model No. 1: ADM1)

2.3.5.1 กระบวนการเปลี่ยนแปลงในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (รูปที่ 2.17) (Conversion Processes in Anaerobic Digestion)

กระบวนการเปลี่ยนแปลงในการย่อยสลาย สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ

1. ชีวเคมี (Biochemical) โดยปกติกระบวนการเหล่านี้จะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ภายนอกหรือภายในเซลล์ และเกิดในส่วนชีวภาพที่มีสารอินทรีย์ การแยกสลายของผสม (เช่น เซลล์ชีวภาพที่ตายแล้ว) ไปเป็นอนุภาค และย่อยต่อไปโดยการไฮโดรไลซิส โดยใช้เอนไซม์ไปเป็นโมโนเมอร์และละลายน้ำของแต่ละชนิด ซึ่งจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ การย่อยสลายสารละลายต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เป็นผลให้เกิดการเพิ่มของมวลชีวภาพและการสลายตัว

2. กายภาพเคมี (Physico-Chemical) กระบวนการเหล่านี้ไม่ได้เกิดจากสิ่งมีชีวิต จะเป็นการรวมของการแตกตัวและรวมตัวของไอออน การถ่ายเทระหว่างแก๊ส/ของเหลว แต่ใน ADM1 จะไม่รวมการตกตะกอนผลึกไว้ในแบบจำลอง เนื่องจากเป็นกรณีที่ไม่เกิดขึ้นในสภาวะการทำงานทั่วไป และจะทำให้แบบจำลองมีความซับซ้อนมาก



รูปที่ 2.17 กระบวนการเปลี่ยนแปลงในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในแบบจำลอง ADM1 (กิตติคุณ ทรยานนท์, 2552)

การแบ่งระหว่าง ส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ (สารอาหาร) และค่าซีโอดีที่เข้าทั้งหมดมีความสำคัญมาก โดยที่ส่วนหนึ่งของซีโอดีที่เข้าอาจไม่สามารถย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนได้ ค่าปัจจัยความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพจนถึงที่สุด (Ultimate Biodegradability Factor :D) เป็นหนึ่งในลักษณะสมบัติที่สำคัญที่สุดของซีโอดีเข้า โดยจะมีผลกับทุกขั้นตอนและมีผลต่อซีโอดีฟลักซ์ในระบบน้ำเสียที่มีค่า $D = 1$ จะมีส่วนประกอบเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมด ซึ่งพบได้ยาก โดยทั่วไปจะใช้เทอมสารอาหาร (SubstrateX เพื่อแสดงถึงซีโอดีส่วนที่ย่อยสลายได้ ขณะที่เป็นสารเหลือ (1-D) จะแสดงถึงสารเหลือที่เป็นสารละลาย (S_p) และอนุภาค (X_p)

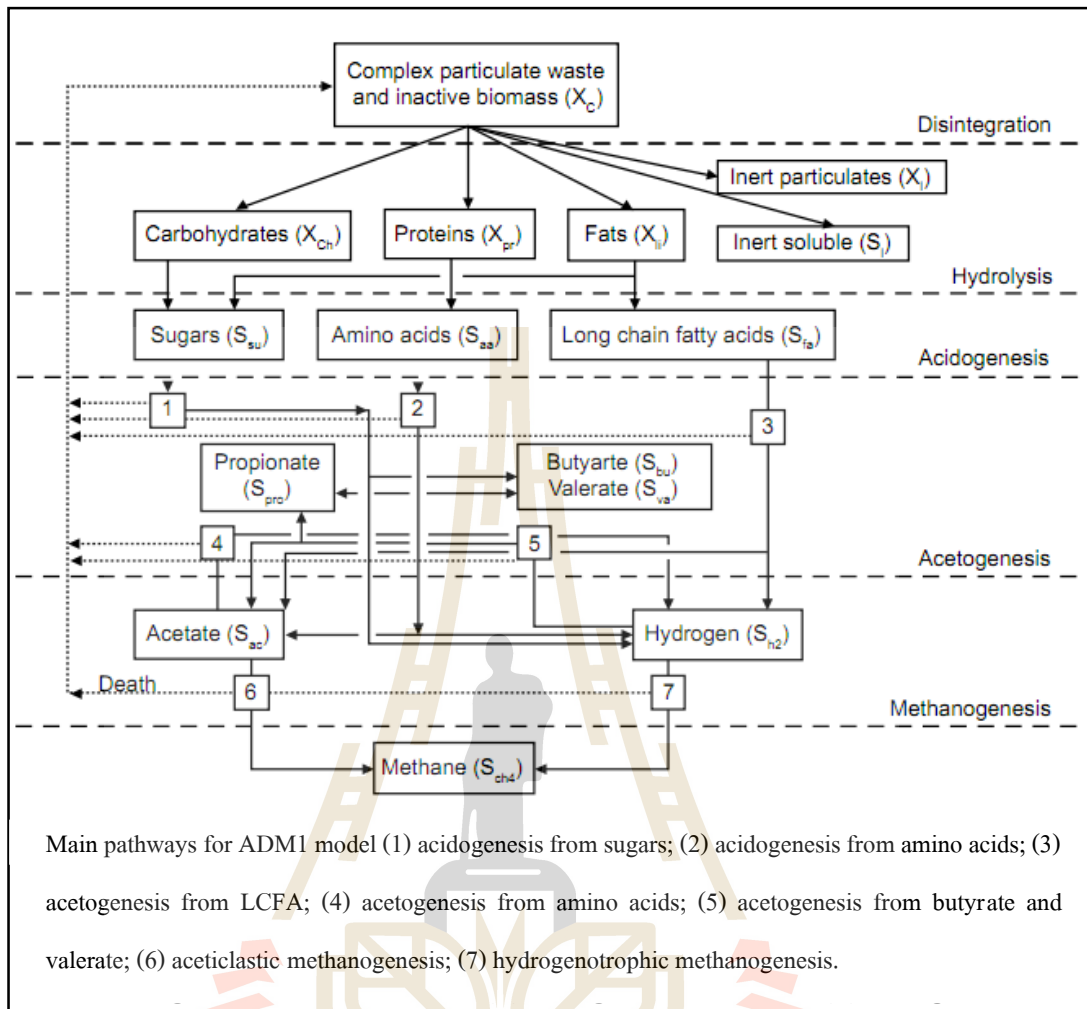
สมการทางชีวเคมีจะเป็นแกนสำหรับแต่ละแบบจำลอง และมีความเป็นไปได้ที่จะแสดงการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยใช้เฉพาะสมการทางชีวเคมี อย่างไรก็ตามในการอธิบายผลของสถานะทางกายภาพเคมี (เช่น pH และความเข้มข้นของแก๊ส) ที่มีต่อปฏิกิริยาทางชีวเคมี จะต้องรวมการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเคมีเข้าไว้ด้วย

2.3.5.2 กระบวนการทางชีวเคมี

1. โครงสร้างของปฏิกิริยาทางชีวภาพใน ADM1

ขั้นตอนที่เกิดภายนอกเซลล์ทั้งหมดจะสมมุติว่าเป็นแบบลำดับที่หนึ่ง ซึ่งเป็นผลรวมจากกระบวนการที่มีหลายขั้นตอนให้อยู่ในรูปแบบที่ง่าย ส่วนขั้นตอนที่เกิดภายในเซลล์จะอธิบายโดย 1) การใช้สารอาหาร(Uptake) 2) การเจริญเติบโต (Growth) และ 3) การตายและสลาย (Decay)

สมการที่สำคัญ คือ สมการอัตราการใช้สารอาหาร ซึ่งจะเป็นแบบโมนด์ที่ขึ้นกับระดับสารอาหาร การเจริญเติบโตของมวลจุลชีพ จะคิดจากการใช้สารอาหาร การสลายของมวลจุลชีพ (ไปเป็นอนุภาคผสม) จะสมมุติว่าเป็นแบบลำดับที่หนึ่งและจะอธิบายโดยแยกต่างหาก เมทริกซ์ของอัตราเร็วของกระบวนการและค่าสโตอิคิโอเมตริก สำหรับปฏิกิริยาทางชีวภาพ สำหรับส่วนประกอบที่เป็นสารละลาย



รูปที่ 2.18 กระบวนการทางชีวเคมีในแบบจำลองแบบไร้ออกซิเจน (Liang et al., 2013)

2. การแตกออก (Disintegration) และการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การแตกออกและการไฮโดรไลซิส เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยจะเกิดการแตกตัวและเกิดการละลายของสารอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารอาหารที่ละลายน้ำ สารอาหารทั้งหมดจะประกอบไปด้วย อนุภาคที่ผสมซับซ้อน (Complex Organic Material) และอนุภาคของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ทั้งนี้อนุภาคของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ก็เป็นผลิตภัณฑ์จากการแตกออกของอนุภาคผสมด้วย ผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายโดยเอนไซม์ของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน คือ มอนอแซคคาไรด์ กรดอะมิโน และกรดไขมันโมเลกุลยาว ซึ่งจุดประสงค์ของการแตกตัวจะเป็นแบบลำดับที่หนึ่ง เนื่องจากกระบวนการแตกออกที่มีความแตกต่างกัน ไม่สามารถใช้ได้กับวิธีการซึ่งแตกต่างและพื้นฐานกว่าในแบบจำลองทั่วไป (กิตติคุณ ตระยานนท์, 2552)

3. การสร้างกรดที่ได้ผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Product Acidogenesis)

สำหรับการสร้างกรดจากมอโนแซคคาไรด์ ใน ADM1 จะใช้กลูโคส (เฮกโซส) เป็นโมโนเมอร์ในแบบจำลองผลิตภัณฑ์ที่สำคัญและปฏิกิริยาสโตอิชิโอเมตริก จากกลูโคส พร้อมด้วย ATP ที่เกิดขึ้น โดยประมาณ จัดลำดับความสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 2.9 โดยที่กรดเหล่านี้สามารถที่จะถูกผลิต แล้วรวมกันเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของกรดผสม

ตารางที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายกลูโคส (กิตติคุณ ตรุษานนท์, 2552)

	Product	Reaction	ATP/mole glucose	Conditions
(i)	Acetate	$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$	4	Low H_2
(ii)	Propionate	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + H_2O$	~Low	Not Observed
(ii*)	Acetate, Propionate	$3C_6H_{12}O_6 \rightarrow 4CH_3CH_2COOH + 2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2O$	4/3	Any H_2
(iii)	Butyrate	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$	3	Low H_2
(iv)	Lactate	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH$	2	Any H_2

ปฏิกิริยา (iii) เป็นปฏิกิริยาไม่ควบคุมของกลูโคสไปเป็นโพรไพโอเนต มีใช้ในหลายแบบจำลอง แต่ใน ADM1 จะใช้ปฏิกิริยา (ii*) แทน (ii) โดยมีเหตุผลดังนี้

- ไม่มีจุลินทรีย์ที่ผลิตเฉพาะโพรไพโอเนตเพียงอย่างเดียวเกิดขึ้น จุลินทรีย์ทั้งหมดที่ผลิตโพรไพโอเนตหรือซัคซินเนต (เป็นสารมัธยันตร์ที่สำคัญก่อนเปลี่ยนไปเป็นโพรไพโอเนต) จะผลิตอะซิเตตด้วย และได้ CO_2 เป็นผลตามมา

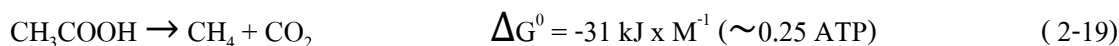
- แหล่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการออกซิไดซ์ฟอร์มเมต หรือไฮโดรเจน เป็นไปได้ยากทางเทอร์โมไดนามิกส์ ยกเว้นที่ภาวะแรงดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าสูง ซึ่งจะขัดแย้งกับสถานะที่จุลชีพปล่อยฟอร์มเมตหรือไฮโดรเจนออกมาจากการหมักมอโนแซคคาไรด์ไปเป็นบิวทิเรต หรืออะซิเตต

ในแบบจำลองจะรวมเอาอะซิเตต โพรไพโอเนต บิวทิเรต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่สำคัญของการสร้างกรดจากมอโนแซคคาไรด์ ซึ่งแต่ละชนิดจะมีวิธีการย่อยต่างกัน

ด้วยเหตุที่จุลชีพจำนวนมากมีความสามารถในการสร้างกรดหลายชนิด ในแบบจำลองเลือกที่จะใช้จุลชีพเพียงกลุ่มเดียว และใช้ค่าพารามิเตอร์รวมใน ADM1 จะไม่มีการปรับแก้ของผลจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนและค่าสโตอิชิโอเมตริกยิลด์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักมอโนแซคคาไรด์ จะเป็นค่าสโตอิชิโอเมตริกคงที่ ($f_{h2,su}$, $f_{ac,su}$, $f_{pro,su}$, $f_{bu,su}$)

4. การสร้างมีเทนโดยพวกที่ใช้อะซิเตต

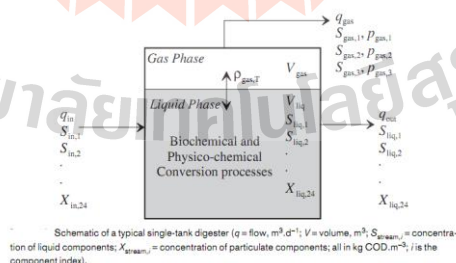
ในขั้นตอนหลักของการเกิดมีเทน อะซิเตตจะถูกแยกออกเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (สมการ 2-19)



สองกลุ่มที่ใช้อะซิเตตในการสร้างมีเทน คือ Methanosarcina พบมากที่ความเข้มข้นอะซิเตตสูงกว่า 10^{-1} M และ Methanosaeta พบที่ความเข้มข้นอะซิเตตต่ำ เมื่อเทียบกับ Methanosarcina กลุ่ม Methanosaeta จะมีค่ายึดติดต่ำกว่า, k_m สูงกว่า, k_s ต่ำกว่า และอ่อนไหวต่อค่า pH มากกว่า Methanosaeta ใช้ ATP 2 โมล ในการเปลี่ยนอะซิเตต 1 โมล (ที่ความเข้มข้นต่ำ) ขณะที่ Methanosarcina ใช้ ATP เพียง 1 โมล ในการเปลี่ยนอะซิเตต 1 โมล (ที่ความเข้มข้นอะซิเตตสูง) ดังนั้น Methanosarcina จะมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่า ขณะที่ Methanosaeta ต้องการระยะเวลาพักเก็บที่นานกว่า แต่สามารถทำงานที่ความเข้มข้นอะซิเตตต่ำได้

5. การใช้งานแบบจำลองในถังกวนผสมสมบูรณ์แบบไหลต่อเนื่องขั้นตอนเดียว

การสร้างสมการขึ้นอยู่กับปฏิกิริยา กรด-เบส จะถูกใช้ในรูปแบบของชุดสมการพีทคณิตแบบปริยาย หรือสมการเชิงอนุพันธ์และอัตราจลศาสตร์เพิ่มเติม ในกรณีแรก การหาคำตอบ ต้องการสมการเชิงอนุพันธ์และสมการพีทคณิต (Differential and Algebraic Equation, DAE) ในกรณีที่สอง ต้องการเพียงสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation, DE)



รูปที่ 2.19 การใช้แบบจำลองใน CSTR ขั้นตอนเดียว

ในแต่ละส่วนประกอบสถานะ (State Component) สมดุลมวลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-20)

$$\frac{dS_{liq,i}}{dt} = q_{in}S_{in,i} - q_{out}S_{in,i} + \sum_{j=1-19} \rho_j V_{i,j} \quad (2-20)$$

โดยที่ $\sum_{j=1-19} \rho_j V_{i,j}$ คือผลรวมของอัตราจุลศาสตร์จำเพาะของกระบวนการ j คูณด้วย $V_{i,j}$ สมมติว่าปริมาตรคงที่ ($q = q_{in} = q_{out}$) สามารถแสดงในรูปของ $S_{liq,i}$ ดังสมการ (2-21) ถ้าปริมาณไม่คงที่เมื่อเทียบกับเวลา จะเป็นตัวแปรสถานะพลวัตตัวหนึ่ง และกฎลูกโซ่จะถูกใช้ในการแสดงสถานะความเข้มข้นของพลวัตใน $\frac{dS_{liq,i}}{dt}$

$$\frac{dS_{liq,i}}{dt} = \frac{q_{in}S_{in,i}}{V_{liq}} - \frac{q_{out}S_{in,i}}{V_{liq}} + \sum_{j=1-19} \rho_j V_{i,j} \quad (2-21)$$

ถ้าเวลากักของสถานะความเข้มข้น (Concentration State) มีการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่นของแข็งในปฏิกิริยาแบบฟิล์มชีวภาพ หรือถึงปฏิกิริยารุ่นอัตราสูง (High rate) เวลาก็สามารถทำให้ยาวขึ้น โดยการแทนที่ลงในเทอมที่สอง ซึ่งเป็นอัตราการไหลของมวล ดังแสดงในสมการ (2-22)

$$\frac{dX_{liq,i}}{dt} = \frac{q_{in}X_{in,i}}{V_{liq}} - \frac{X_{liq,i}}{t_{res,x} + V_{liq}/q} + \sum_{j=1-19} \rho_j V_{i,j} \quad (2-22)$$

โดยที่ $t_{res,x}$ คือเวลากักเก็บของส่วนประกอบของแข็งที่มากกว่าเวลากักทางชลศาสตร์ เป็นการจำลองโดยแยกเวลากักของแข็งออกจากเวลากักทางชลศาสตร์ (ถ้า $t_{res,x} = 0$) เวลากักของแข็งทั้งหมด (SRT) ก็คือ V_{liq}/q

อัตราจุลศาสตร์การถ่ายเทของเหลว-แก๊ส (Liquid Volume – Specific) สำหรับ S_{h2} , S_{c2} และ S_{co2} จะเพิ่มเติมจากสมการอัตรา

$$\rho_{T,h2} = k_L a (S_{liq,h2} - 16K_{H,h2}P_{gas,h2}) \quad (2-23)$$

$$\rho_{T,c4} = k_L a (S_{liq,c4} - 64K_{H,c4}P_{gas,c4}) \quad (2-24)$$

$$\rho_{T,co2} = k_L a (S_{liq,co2} - K_{H,co2}P_{gas,co2}) \quad (2-25)$$

โดยที่ $p_{T,i}$ คืออัตราการถ่ายเทของแก๊ส i และ S_{liq,CO_2} คือ สัดส่วนของอนินทรีย์คาร์บอนในรูปของเหลว

2.4 เหล็กประจุนัย

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

เหล็ก (Iron) โดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชันเป็น 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์หรือเหล็กประจุนัย (Zero valent iron) เท่านั้น ที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อให้มีคุณสมบัติดีขึ้น ได้แก่

2.4.1.1 เหล็กอ่อน (Wrought iron)

คือเหล็กที่ได้จากเตาพุดเดิล (Puddel furnace) ซึ่งเป็นกรรมวิธีผลิตเหล็กที่เก่าแก่มาก เป็นเหล็กที่มีเนื้อเหล็กถึง 99.99% เมื่อเผาให้ร้อนเหล็กจะตีขึ้นรูปได้ง่ายมากจึงเป็นที่นิยมของช่างตีเหล็ก

2.4.1.2 เหล็กกล้า (Steel)

คือเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม โดยมีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 1.7 หรือ 2% นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (Impurities) เช่น ซิลิกอน แมงกานีส กำมะถัน และฟอสฟอรัส

2.4.1.3 เหล็กหล่อ (Cast iron)

คือเหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 2% ขึ้นไป ใช้ประโยชน์ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุประกอบชิ้นส่วน

2.4.1.4 เหล็กดิบ (Pig iron)

คือเหล็กที่นำมาจากการจุดสินแร่ดิบโดยกรรมวิธีการทำเหมืองแร่ ซึ่งมีลักษณะเป็นเหล็กไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีสิ่งอื่นเจือปนอยู่โดยเฉพาะออกซิเจนซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในสินแร่เหล็ก ออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์

เหล็กประจุนัย (Fe^0) เป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) พร้อมกับสารที่เกิดจากการรีดิวซ์กรดคือแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (Solubility constant) ตามสมการที่ (2-26) และ (2-27) ดังนี้



เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น จะละลายน้ำได้น้อยจึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็วและเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว ตามสมการที่ (2-28) ดังนี้



เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการดึงน้ำออก ดัง สมการที่ (2-29) และ (2-30) ต่อไปนี้



สนิมเหล็กที่เห็นโดยทั่วไปคือ Fe_2O_3 จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (Anodic region) ไอออนอื่น ๆ ก็จะมาตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเกาะเอาสนิมมาวิเคราะห์หุ้ก็มักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษหิน ดิน ทราเยปนอยู่ด้วยเสมอ (วรรณวิภา ผลิตาหาญ, 2547; ศุภทวดี วีระพงษ์, 2548)

2.4.2 กระบวนการรีดักชันด้วยเหล็กประจุศูนย์

กระบวนการรีดักชันด้วยเหล็กประจุศูนย์ นิยมใช้ในการบำบัดสารประกอบคลอรีน สารกำจัดศัตรูพืช สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น เหล็กประจุศูนย์เป็นสารรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ (reducing agent) ที่สารต่างๆในสิ่งแวดล้อมสามารถที่จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยง่าย

เนื่องจากตัวมันเองนั้นพยายามที่จะเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปที่มีความเสถียรมากกว่านี้คืออยู่ในรูปของอนุมูลเฟอร์รัสที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของอนุมูลเฟอร์ริกที่เป็นของแข็ง

Matheson and Tratnyek, (1994) ได้เสนอการเปลี่ยนรูปจากเหล็กประจุศูนย์ไปเป็นอนุมูลเฟอร์รัส ซึ่งเป็นสาเหตุของผุกร่อนของเหล็ก



จากสมการที่ 2-31 แสดงให้เห็นถึงกลไกการให้อิเล็กตรอน เหล็กประจุศูนย์จะเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลเฟอร์รัส และให้อิเล็กตรอน 2 ตัว โดยตรงจากผิวของเหล็กหรือถ่ายทอดต่อไปยังสารที่ต้องการบำบัด



จากสมการที่ 2-33 แสดงให้เห็นว่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีความสำคัญเป็นอย่างมาก ที่ pH ต่ำจะช่วยให้ผิวของเหล็กยังคงสภาพที่เหมาะสมต่อการทำ ปฏิกิริยากับ โมเลกุลกลุ่มฮาโลเจนท์ (halogenated molecule) นอกจากนี้ในบางกรณีน้ำอาจจะเข้ามารับอิเล็กตรอนที่ผิวของเหล็กประจุศูนย์ก่อนสารอินทรีย์ ทำให้เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลและแก๊สไฮโดรเจนและปล่อยอนุมูลเฟอร์รัสออกมาอนุมูลเฟอร์รัสที่เกิดขึ้นยังสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อจนเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลเฟอร์ริก

นอกจากนั้นเหล็กประจุศูนย์ยังสามารถรีดิวซ์ไฮโดรเจนไอออนในน้ำให้กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนได้ด้วยดังสมการที่ (2-34)



สภาพแวดล้อมที่เป็นด่างนั้นออกไซด์และไฮดรอกไซด์จะเกาะติดอยู่ที่ผิวของเหล็กประจุศูนย์ ทำให้ไม่เหมาะแก่การนำไปใช้งาน ควรมีการทำความสะอาดก่อนการนำไปใช้ (pre-treatment) และปล่อยให้แห้งในสภาวะที่มีการรมแก๊สไนโตรเจน จากนั้นเก็บไว้ในที่อับอากาศ ในระหว่างการทำปฏิกิริยา สภาพที่เป็นด่างก็จะเป็นตัวช่วยป้องกันการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของเหล็ก

กล่าวคือไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะถูกสะเทินโดยไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยากัดกร่อน อีกทั้งเหล็กจะเกิดการตกผลึกเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$ or $Fe(OH)_3$) ที่ pH สูงกว่า 9 (Matheson และ Tratnyek, 1994)

2.4.3 กลไกการทำงานของเหล็กประจุศูนย์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส

เหล็กประจุศูนย์ เป็นวัสดุโลหะราคาถูก อีกทั้งเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรง หรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ดีเนื่องจากมีศักย์การนำไฟฟ้า ($E^0 = -0.447 V$) ต่ำกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมีเทน (Farrell et al., 2000; Keum and Li, 2004; Uzum et al., 2008; Chatterjee et al., 2010; Xie and Cwiertny, 2012; Zhu et al., 2012; Klas and Kirk, 2013) นอกจากนี้เหล็กประจุศูนย์ยังมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส (Zhang et al., 2011)

2.4.3.1 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเนื่องจากการเกิดไบโอแก๊ส

กลไกการเกิดไบโอแก๊สจากการให้อิเล็กตรอนของเหล็กประจุศูนย์แสดง ดังนี้



จากการศึกษาพบว่าพบ กรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์มีหลายชนิด ซึ่งบางชนิดแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมีเทนได้ โดยเป็นกรดไขมันระเหยง่ายขนาดใหญ่ เช่น กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทิริก (McCarty, 1986; Tatara et al., 2008) นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนกรดโพรไพโอนิกไปเป็นกรดอะซิติกไม่สามารถเกิดขึ้นได้จนกว่าความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนจะลดลงน้อยกว่า 10 Pa (Tatara et al., 2008; Li, 2009) พลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy, ΔG) สามารถอธิบายการเปลี่ยน กรดโพรไพโอนิก และ homoacetogenesis ได้ตามสมการของ Van't Hoff แสดงได้ดังนี้สมการ (2-42)

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln(\text{ผลิตภัณฑ์} / \text{สารตั้งต้น}) \quad (2-42)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน ΔG^0 คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของการเกิด (standard free energy of formation) ของสารประกอบ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบนั้น 1 โมล จากธาตุองค์ประกอบที่สภาวะมาตรฐาน (Fey et al., 2000) ภายใต้เงื่อนไข (1 M, 10^5 Pa, 298.14 K) ดังสมการ (2-43) – (2-44)



$$\Delta G = +76.1 \text{ kJ/mol}$$



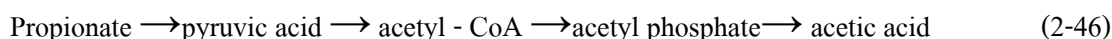
$$\Delta G = -55.1 \text{ kJ/mol}$$

ทั้งสองสมการ เป็นการปรับกรด (หรือการเปลี่ยนแปลงกรดโพสไฟโอนิก) คือ การปรับค่า pH ของอาหารให้เป็นกรดด้วย กรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดซิตริก (citric acid) หรือ กรดแอซีติก (acetic acid) และ homoacetogenesis ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักในขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นกรดอะซีติก อาจจะรวมเป็นสมการเดียวกัน แสดงดังสมการที่ (2-45)



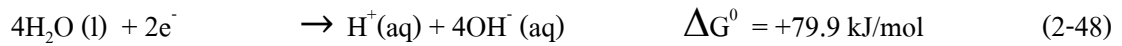
$$\Delta G = +139.1 \text{ kJ/mol}$$

การเปลี่ยนกรดโพสไฟโอนิกเป็นกรดอะซีเตต แสดงได้ดังสมการ 2-46 (Nybroe et al., 1992)

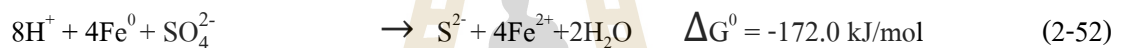


2.4.3.2 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเนื่องจากกรดซัลฟูริก

เหล็กประจุศูนย์ (Fe^0) เป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการที่ (2-47) – (2-50)



เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) พร้อมกับสารที่เกิดจากการรีดิวซ์กรดคือแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ SO_4^{2-} และเกิดเป็นตะกอน pyrite (FeS_2) และ siderite (FeCO_3) ดังสมการที่ (2-51) – (2-57)

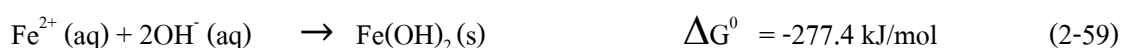


2.4.3.3 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์

เนื่องจากในระบบมีการปรับ pH ให้เป็นกลางโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เหล็กประจุนทรีย์ที่ใส่เข้าสู่ระบบ จึงมีกลไกการกัดกร่อนของเหล็กเนื่องจากการแตกตัวของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (2-58)



เฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออน เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ดังสมการที่ (2-59) – (2-60)





เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) จะได้เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₃), hematite (Fe₂O₃), magnetite (Fe₃O₄), และ Goethite (FeOOH) ดังสมการ (2-61) – (2-65)



2.4.3.4 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเนื่องจากคาร์บอเนต

เนื่องจากไฮเดียมคาร์บอเนตเป็นเบสอ่อนที่สามารถรับโปรตอนจากกรดได้ 2 ครั้ง ครั้งละ 1 โมล ครั้งแรกคาร์บอเนตไอออนรับโปรตอนจากกรด 1 โมล เกิดเป็นไบคาร์บอเนตไอออน ดังสมการ (2-66) และเมื่อทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออน จะเกิดเป็น siderite (FeCO₃) ดังสมการที่ (2-67)



สารละลายมีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์ เพราะมีไอออนของคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตผสมอยู่ด้วยกัน และหลังจากนั้นไบคาร์บอเนตไอออนรับโปรตอนจากกรดอีก 1 โมล เกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H₂CO₃) ดังสมการที่ (2-68) – (2-70)



2.4.4 ไคเนติกระหว่างเหล็กประจุศูนย์ในการเกิดไฮโดรเจนจากกากมันสำปะหลัง

2.4.4.1 ไคเนติกการกัดกร่อนเหล็กประจุศูนย์และการหมักแก๊สไฮโดรเจน

การกัดกร่อนของเหล็กมีความสำคัญในระบบการบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากตัวของเหล็กประจุศูนย์เองนั้นพยายามที่จะเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปที่มีความเสถียรมากกว่านี้ คืออยู่ในรูปของอนุมูลเฟอร์รัสที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของอนุมูลเฟอร์ริกที่เป็นของแข็ง สารผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ H_2 แสดงดังสมการ (2-71) (Xiao et al., 2013)

$$\left\{ \frac{dS_{ZVI}}{dt} \right\}_{\text{corrosion}} = \frac{S_{Fe}}{K_{S,Fe} + S_{Fe}} V_{m,Fe} \quad (2-71)$$

เมื่อ $V_{m,Fe}$ = อัตราสูงสุดในการกัดกร่อนของเหล็กประจุศูนย์

$K_{S,Fe}$ = ค่าคงที่ในการดูดซึมของเหล็กประจุศูนย์

การผลิตแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จากการกัดกร่อนของเหล็กประจุศูนย์ สามารถอธิบายได้ดังสมการ 2-72

$$\left\{ \frac{dS_{H_2}}{dt} \right\}_{\text{production}} = f_{H_2,Fe} \frac{S_{Fe}}{K_{S,Fe} + S_{Fe}} V_{m,Fe} \quad 2-72$$

เมื่อ $f_{H_2,Fe}$ เป็นสัดส่วนของการผลิตแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จากการกัดกร่อนเหล็กประจุศูนย์

2.4.4.2 ไคเนติกการย่อยสลาย Less biodegradable pollutants (LBPs) เนื่องจาก Promotion เหล็กประจุศูนย์

เหล็กประจุศูนย์ทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอนและช่วยลด Oxidation Reduction Potential หรือ ORP ในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจน LBPs มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ อัตราการดูดซึมของ LBPs อธิบายดังสมการ (2-73) และ สมการ (2-74) (Xiao et al., 2013)

$$\left\{ \frac{dS_{LBPs}}{dt} \right\}_{\text{degradation}} = -k_{m,LBPs} \frac{S_{H_2}}{K_{S,H_2} + S_{H_2}} \frac{S_{LBPs}}{K_{S,LBPs} + S_{LBPs}} X_{H_2,I_1} P_{Fe} \quad (2-73)$$

$$P_{Fe} = \frac{S_{Fe^0}}{K_{P,Fe}} + 1 \quad (2-74)$$

เมื่อ P_{Fe} = เป็นตัวบ่งชี้การส่งเสริมการย่อยสลาย LBP's ด้วยเหล็กประจุศูนย์
 $K_{P,Fe}$ = ค่าคงที่ Promotion ของเหล็กประจุศูนย์

ซึ่งหมายความว่าอัตราการดูดซึมของ LBP's เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์เข้าสู่ระบบ อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอาจจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในระบบ

2.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอแก๊สโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส

Wu et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการใช้เหล็กประจุศูนย์ในการเพิ่มการผลิตแก๊สมีเทนและการลดซัลเฟต ด้วยระบบ anaerobic granular sludge reactors โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ADM1 เพื่อใช้ในการอธิบายการผลิตแก๊สมีเทนที่เพิ่มขึ้นและลดลงของซัลเฟตโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 90 mm × 300 mm) เพื่อรองรับน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ 9.4 L ทำการศึกษาที่ระยะเวลาเก็บกัก 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 30 วัน จากการศึกษาพบว่า ZVI ส่งเสริมการย่อยสลาย propionate และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเป็น 43% พร้อมกันนั้น ZVI ยังยับยั้งการเกิด H_2S ในกระบวนการ acetogens, methanogens and sulfate reducing bacteria (SRB) ผ่านปฏิกิริยา $(Fe^0 + 2H^+ = Fe^{2+} + H_2)$

Zhang et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพน้ำเสียจากถังตกตะกอนชั้นที่ 2 ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 30 นาที ร่วมกับการไฮโดรไลซิสด้วยสารต่าง 4 M เป็นเวลา 20 วัน ปริมาณตะกอนที่ใช้ 200 ml อย่างไรก็ตามการปรับสภาพด้วยสารต่าง อาจยับยั้งจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทน จึงได้มีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์ (ZVI) เข้ามาในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็น ZVI powder (0, 1, 2, 5 and 10 g/L, 0.2 mm diameter, 0.05 m²/g BET surface area, purity >98%) นอกเหนือจาก ZVI ที่ทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดแก๊สมีเทนเร็วขึ้น ยังพบว่าเหล็กประจุศูนย์สามารถทำให้ผลผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 91.5% เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยน VFA ไปเป็นอะซิเตตได้มากขึ้น ทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดในระบบลดลง 27.6 – 18.8 ml/g VSS ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มขึ้น ZVI 0 - 10 กรัม / ลิตร ทำให้ผลผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 1.9 – 32.3 ml/g VSS ตามลำดับ

Zhen et al. (2015) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากกากตะกอนของเสีย โดยใช้เหล็กประจุศูนย์แบบแผ่น (ZVSI) มีการทดสอบโดยใช้ scale

experiments offering uence of ZVSI (ความกว้าง 2.0 mm ความหนา 0.35mm) ขนาด 0, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 g/g VSS ตามลำดับ ในระหว่างการหมักมีการกวน 100 ± 1 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิ 35 ± 0.5 °C เป็นระยะเวลา 50 วัน ผลจากการศึกษาพบว่าเหล็กประจุศูนย์แบบแผ่น (ZVSI) ขนาด 1.0 g-ZVSI / g-VSS สามารถเพิ่มปริมาณแก๊สมีเทนในระบบได้สูงสุดถึง 174.9 ± 1.5 ml/ g VSS คือเพิ่มขึ้นจากสถานะควบคุม 38.3% จากการคำนวณยังพบว่าเหล็กประจุศูนย์แบบแผ่น (ZVSI) สำหรับการไฮโดไลซิสของตะกอน การอะซิโดเจเนซิส และอัตราการปล่อยแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น $52.6 \pm 0.4\%$, $44.5 \pm 2.9\%$ และ $40.8 \pm 0.3\%$ ตามลำดับเมื่อเทียบกับสถานะควบคุมที่ไม่มีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์แบบแผ่น (ZVSI)

Feng et al. (2014) ได้ทำการศึกษการย่อยสลายกากตะกอนน้ำเสียจากถังตกตะกอนในสภาวะไร้อากาศโดยใช้เหล็กประจุศูนย์เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ก่อนการหมักตะกอน มีการปรับสภาพตะกอนด้วย NaOH 4 mol/L เพื่อปรับให้มี pH เท่ากับ 12 และกวนตะกอนที่ 80 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ภายหลังจากการปรับสภาพตะกอนด้วยค่าเวลาที่กำหนด ก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ตะกอนถูกปรับ pH ให้เป็นกลาง สำหรับเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็น ZVI powder (0, 1, 4, and 20 g/L, 0.2 mm diameter, 0.05 m²/g BET surface area, purity >98%) จากการศึกษาเมื่อเทียบกับสถานะควบคุมที่ไม่มีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์ พบว่ามีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น 21.9% และการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้น 37.3% ผลจากการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์เข้าไปในระบบ ทำให้อะซิเตทเพิ่มมากขึ้นและ propionate น้อยลง เป็นผลทำให้การผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นจากเดิม 43.5% และมีอัตราการลดกากตะกอนเพิ่มขึ้น 12.2%

ตารางที่ 2.10 สรุปการศึกษางานวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพผลิตไบโอแก๊สโดยใช้เหล็กประจุศูนย์สามารถสรุปดังตารางต่อไปนี้

เอกสารอ้างอิง	วัสดุที่ใช้	ขนาด	ความเข้มข้น	ระบบ และลักษณะน้ำเสีย	สภาวะควบคุม (ไม่เติมเหล็ก)	ไบโอแก๊สที่เกิดขึ้น
Kong et al. (2017)	ผงเหล็กจากอุตสาหกรรม	ความบริสุทธิ์ > 98%, \emptyset 0.2 mm, พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET	400 g Fe/kg VSS	Batch bioreactor; thermophilic วัสดุเหลือทิ้งจากครัวเรือน	0.220 – 0.240 m ³ /kg TVS	0.715 m ³ /kg TVS
Hao et al. (2017)	ผงเหล็ก	ความบริสุทธิ์ > 98%, \emptyset 0.2 mm, พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET	500 g Fe/kg TSS	Continuous two-phase digesters ตะกอนน้ำเสีย	0.1250 m ³ /kg VSS	0.2200 m ³ /kg VSS
Kong et al. (2016)	เศษเหล็กจากอุตสาหกรรม	ความบริสุทธิ์ > 98%, กว้างxยาว (1 cm x 2 cm)	400 g Fe/kg VSS	Continuous two-phase digesters วัสดุเหลือทิ้งจากครัวเรือน	0.0584 m ³ /kg TVS	0.380 m ³ /kg TVS
Zhen et al. (2015)	เศษเหล็กจากอุตสาหกรรม	กว้างxหนา (2 mm x 0.35 mm)	1000 g Fe/kg VSS	Continuous two-phase digesters น้ำเสียจากการบำบัดขั้นที่สอง	0.1264 m ³ /kg VSS	0.1749 m ³ /kg VSS
Zhang et al. (2015)	ผงเหล็ก	ความบริสุทธิ์ > 98%, \emptyset 0.2 mm, พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET	1000 g/kg VSS	Continuous two-phase digesters ตะกอนน้ำเสียโรงงาน	0.2015 m ³ /kg VSS	0.2968 m ³ /kg VSS
Feng et al. (2014)	ผงเหล็ก	ความบริสุทธิ์ > 98%, \emptyset 0.2 mm, พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET	1400 g Fe/kg TSS	CSTR ; two-phase system ; Mesophilic, ตะกอนน้ำเสีย โรงงาน	0.1926 m ³ /kg VSS	0.2764 m ³ /kg VSS
Zhang et al. (2014)	ผงเหล็กและเศษเหล็กจากอุตสาหกรรม	ความบริสุทธิ์ > 98%, \emptyset 0.2 mm, พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET ความบริสุทธิ์ > 95%, กว้างxยาว xหนา (8 mm x 4 mm x 0.5 mm)	100 g Fe/kg TSS	Continuous two-phase digesters ตะกอนน้ำเสียโรงงาน	0.1458 m ³ /kg VSS	ผงเหล็ก 0.2651 m ³ /kg VSS เศษเหล็ก 0.2799 m ³ /kg VSS

2.4.6 มาตรฐานน้ำทิ้งของเหล็ก

การควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำเป็นการป้องกันและลดการนำสารมลพิษลงสู่แหล่งน้ำ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ให้มีค่าของสารแขวนลอย 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าบีโอดี 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จะต้องตั้งอุปกรณ์กำจัดน้ำเสียและดำเนินการกำจัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐาน ดังที่กำหนดไว้ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

การกำจัดน้ำทิ้ง จากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ทำให้ น้ำเสียอยู่ในเกณฑ์ต่ำสุดที่จะปล่อย ลงสู่แหล่งน้ำ ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กำหนดมาตรฐาน น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดให้โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) และกระทรวงอุตสาหกรรมของประเทศไทย กำหนดได้ตามตารางมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.12 ค่ามาตรฐานเหล็กที่สามารถทิ้งได้

อ้างอิง	ปี	Total Iron (Fe)
ACGIH TLV	2559	5 mg/L
CPHEEO	2555	3 mg/L
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	2552	1 mg/L
Ecuador	2547	25 mg/L
THE ENVIRONMENT PROTECTION ACT	2545	2 mg/L
Jordanian Standard	2545	5 mg/L
Kuwait	2544	5 mg/L
Saudi Arabia	2543	2 mg/L
Brazil	2540	15 mg/L
Paraguay	2539	5 mg/L
National Environment Statute	2538	10 mg/L
Venezuela	2538	25 mg/L
Oman	2536	5 mg/L
Standards for CETP	2534	3 mg/L

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานของโครงการวิจัย การเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายกากมันสำปะหลัง ในสภาวะไร้อากาศโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ ใช้สถานที่ปฏิบัติงาน คือห้องปฏิบัติการอาคารเครื่องมือ 11 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินการทดลอง แบบกะ (Batch Test) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลและหาความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ ได้แบ่งการทดลอง ออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส และส่วนที่ 2 ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS ขั้นตอนที่ 2.2 ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส และขั้นตอนที่ 2.3 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส รูปแบบและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

รูปแบบและขั้นตอนของการวิจัย เริ่มจากการเตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการทดลอง เตรียมกากมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้น 3%TS จากนั้นเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ เหล็กประจุศูนย์ และหลังจากนั้นเริ่มดำเนินการทดลอง ซึ่งการทดลองจะประกอบไปด้วย การทดลองแบบกะ (Batch test) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลและทดสอบสมมติฐานตามหลักสถิติ เป็นขั้นตอนสุดท้าย

3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงสารเคมีในการปรับค่า pH ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) อะซิโตน (Acetone) แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas) กรดไนตริก (HNO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แต่ไม่รวมสารเคมีที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนและหลังการหมัก

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เครื่องวัด pH (pH Meter, S220 Seven Compact™ pH/Ion S220, Mettler-Toledo S.A.E., Spain) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (Analytical Balance, PAJ 1003, PT. Octa Prima RIMA Lestari, OHAUS – U.S.A.) ตู้ควบคุมอุณหภูมิตรวจวิเคราะห์ค่า BOD (BOD incubator & Thermo cabinets, WTW, Germany) เครื่องกรองสารละลายโดยใช้เมมเบรน (Membrane Filtration, SM 16275, SARTORIUS, Germany) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump, DOA-P504-BN-LabModel, GAST, U.S.A) ชุดเครื่องย่อยไนโตรเจน (Graphite Digester, DK20, VELP, Italy) ชุดเครื่องกลั่นไนโตรเจน (Nitrogen Distillator, UDK123, VELP, Italy) เครื่องเขย่าผสมสารละลาย (Vortex Mixer, Fine Vortexes, FINEPCR, U.S.A.) เครื่องวัดแก๊ส (Gas Leak Detector, GC001, Smart, U.S.A.) เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer, 7315, Jenway, England) ชุดเตาเผา 550 °C (High-Temperature Muffle Furnaces, STABLETEMP, Cole-Parmer, U.S.A.) ชุดตู้อบลมร้อน (Hot air oven, RF115redLINE, BINDER, Germany) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Consul21 Centrifuse, Orto alresa, Germany) เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator Shaker, S26/Orbital Shaker, CAT, Korea) เครื่องเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Powder X-ray Diffraction (XRD), D8 ADVANCE, BRUKER axs, Germany) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM, JSM-7800F, JEOL, Germany) อุปกรณ์ชุดทดลองแบบกะและเครื่องแก้วต่าง ๆ

3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลัง ได้จากกากมันสำปะหลังในระบบ Covered Lagoon บริษัทอุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด ตั้งอยู่ที่ 61 หมู่ 3 ถนนราชสีมา-ปักธงชัย ตำบลหนองจะบก อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัด นครราชสีมา 30000 ซึ่งมีลักษณะ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการศึกษา
pH	-	4.23
BOD (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	mg/L	42,000
COD (Chemical Oxygen Demand : COD)	mg/L	55,400
VFA (Volatile Fatty Acids)	Mg CH ₃ COOH/L	161.67
Alkalinity	Mg CaCO ₃ /L	336.67
TP (Total Phosphorus)	mg/L	70.86
Ortro-P (Ortro Phosphorus)	mg/L	54.90
TKN (Total Kjeldahl Nitrogen)	mg/L	393.52
TS (Total Suspended Solids)	%	23.73± 0.1
TVS (Total Volatile Solids)	%	79.56± 0.1

*หมายเหตุทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

3.2.2 เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (Seed)

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักย่อยกากมันสำปะหลังเตรียมโดยใช้ตะกอนจากถัง Covered Lagoon บริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด ตั้งอยู่ที่ 61 หมู่ 3 ถนนราชสีมา-ปักธงชัย ตำบลหนองจะบก อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัด นครราชสีมา 30000 ซึ่งมีลักษณะ ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ลักษณะเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	เชื้อจุลินทรีย์
pH	4.13
COD (mg/L)	18,666
ของแข็งทั้งหมด,TS (mg/L)	40,465
ของแข็งระเหย,TVS (mg/L)	38,336
ของแข็งแขวนลอยระเหย, TSS (mg/L)	37,936
กรดไขมันระเหยง่าย, VFA (mg CH ₃ COOH/L)	140
อัลคาไลน์ตี (mg CaCO ₃ /L)	716

3.2.3 เหล็กประจุศูนย์

ฝอยเหล็กจากท้องตลาด ขนาด กว้างxยาวxหนา 68 x 10,000 x 50 μm นำไปทำความสะอาดโดยล้างฝอยเหล็กจำนวน 50 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อปริมาตร จำนวน 200 ml นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและกรดที่หลงเหลือ ล้างด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดน้ำ ทำให้แห้งด้วยการอบแห้ง เก็บฝอยเหล็กที่ผ่านการล้างและทำให้แห้งแล้วในถุงซิปล็อค เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป (Lavine et al., 2001; Bang et al., 2005) ซึ่งการควบคุมคุณภาพของฝอยเหล็ก ทำได้โดยการผสมฝอยเหล็กหลังจากคัดเลือกขนาดแล้วให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งผสมเพียงครั้งเดียวและใช้ตลอดการทดลอง เพื่อให้ฝอยเหล็กมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

3.3 รูปแบบของการทดลอง

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1. ศึกษาผลของ พีเอชและอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส 2. ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง

3.3.1 การศึกษาผลของพีเอช อุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส

ออกแบบการทดลองเป็นแบบกะ (Batch Reactor) กำหนดให้มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยของพีเอช อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา การทดลองได้ทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง โดยจุดนี้จะทำการทดลอง 3 ครั้ง การออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทำการทดลองจำนวน 14 การทดลอง ทุกการทดลองทดสอบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่าย

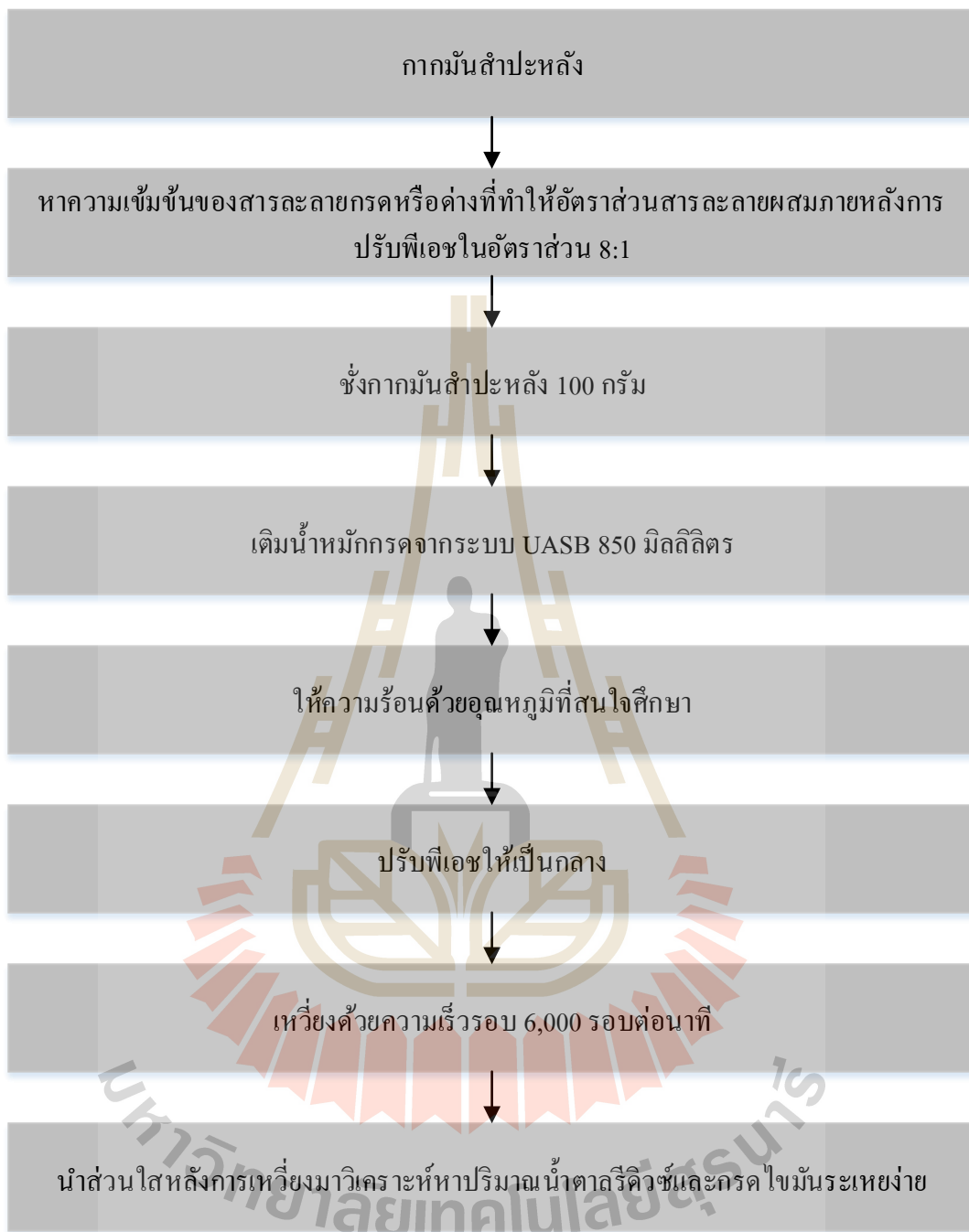
จากการศึกษาของ กิตติกันท์ สุขวานิชย์, 2554 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิธี Design of Experiment เป็นวิธีที่ใช้ในการเปรียบเทียบของทุกสถานะ โดยกำหนดระดับของความมีนัยสำคัญ ที่ 0.05 และให้ผลของปัจจัยที่มีผลต่อดัชนีชี้วัด ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่าย พบว่า ทุกปัจจัยมีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายมากที่สุดคือ พีเอช และค่าปัจจัยร่วมระหว่างพีเอชและอุณหภูมิมีค่ามากกว่าปัจจัยร่วมอื่นๆ ซึ่งเป็นที่มาในการเลือกช่วง pH 1-13 มาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

- ขั้นตอนการทดลอง

วิธีการทดลองเพื่อหาปัจจัยของ พีเอช อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการเกิดไฮโดรไลซิส ขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.1 การทดลองเริ่มจากหาความเข้มข้นของสารละลายกรดหรือด่างตามต้องการ โดยการเติมสารละลายกรดหรือด่างที่ความเข้มข้นหนึ่งเรื่อยๆ จนได้ค่าพีเอชที่ต้องการ จดปริมาตรสารละลายที่เติมจากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นที่ต้องการเพื่อให้ได้อัตราส่วนการเติมสารละลายกรดหรือด่างต่อกากมันสำปะหลังเท่ากับ 8:1 โดยปริมาตรสารละลายต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง จากนั้นเริ่มการทดลองโดยใช้กากมันสำปะหลัง 100 กรัม มาผสมกับน้ำหมักกรดจากระบบ UASB 850 ml ได้สารละลายกากมัน 950 ml ซึ่งมีความเข้มข้นเป็น 3%TS เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเดินระบบจริง (พิชยา สวยศม, 2550) หลังจากนั้นนำสารละลายดังกล่าวให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่สนใจศึกษา เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา ปรับ พีเอชเป็นกลางทั้งนี้ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายผสมเปลี่ยนแปลง $\pm 10\%$ และนำไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที ใช้เวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการแยกระหว่างตะกอนและสารละลายใส เพื่อนำไปตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีเอนเอส (Dinitrosalicylic Colorimetric Method) (Miller, 1959) และกรดไขมันระเหยง่ายง่าย ด้วยวิธีมาตรฐานของ APHA, 2005

ตารางที่ 3.3 ออกแบบการทดลอง ศึกษาพีเอช และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิสกากแป้งมันสำปะหลัง (กิตติกันท์ สุขวานิชย์, 2554)

Run number	pH	อุณหภูมิ (°C)	Run number	pH	อุณหภูมิ (°C)
1	1	100	8	8	100
2	2	100	9	9	100
3	3	100	10	10	100
4	4	100	11	11	100
5	5	100	12	12	100
6	6	100	13	13	100
7	7	100	Control	4.23	28



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาผลของพีเอช และอุณหภูมิ

3.3.2 ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง

การศึกษาผลของเหล็กประจุศูนย์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากกากมันสำปะหลัง ที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วย กรด-เบส จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 เพื่อทำการทดลองแบบกะ (Batch test) สำหรับหาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมที่สุดต่อการผลิตไบโอแก๊สที่เกิดขึ้น ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

3.3.2.1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS

- ขั้นตอนในการเดินระบบ

ขั้นตอนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเริ่มจากการนำสารละลายกากมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยช่วงพีเอช ที่กำหนด การเตรียมสารอาหารที่เหมาะสมกำหนดสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 แล้วปรับพีเอชให้เป็นกลาง เติมเหล็กประจุศูนย์แบบฝอยขึ้น ความเข้มข้น 100 g/kg TVS ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนของแข็งระเหย 0.5:1 ทำการบรรจุสารละลายในขวดหมักใต้อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนนาน 3 นาทีก่อนปิดขวดให้สนิท ทำการหมักเป็นเวลา 60 วัน เมื่อทำการหมักครบตามเวลาที่กำหนดให้ทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย และนำไปตรวจซีไอดี, ของแข็งรวม, ของแข็งระเหย, ความเป็นด่าง (Alkalinity, A), อุณหภูมิ (Temperature), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), น้ำตาลรีดิวซ์, ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFA) ตามวิธีมาตรฐาน APHA, (2005), องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กประจุศูนย์ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Analysis (XRD), พื้นผิวของวัสดุ ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) และหาปริมาณของธาตุเหล็ก ด้วยเครื่อง Spectrophotometry รายละเอียดความถี่การเก็บตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.3 การทดลองทั้งหมดนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม ซึ่งใช้กากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส มาปรับพีเอชให้เป็นกลางและเติมสารละลายอาหารแล้วหมักกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ในการเก็บตัวอย่าง สำหรับการหมัก 60 วัน ทำการวัดปริมาณแก๊ส

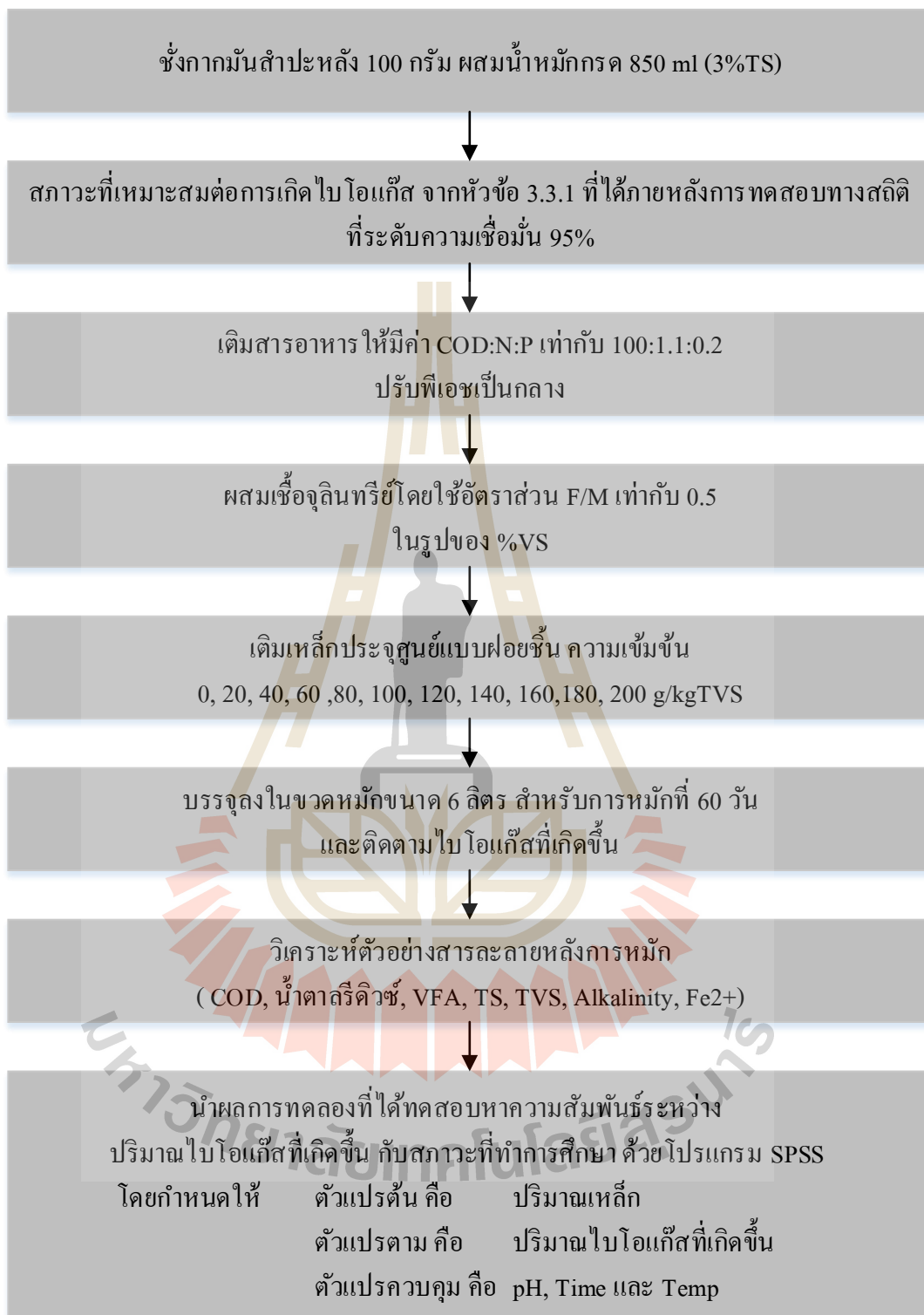


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเดินระบบเพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็ก
ประจุศูนย์ 100 g/kg TVS

3.3.2.2. ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

- ขั้นตอนในการเดินระบบ

ขั้นตอนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเริ่มจากการนำสารละลายกากมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยช่วงพีเอชต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS ในขั้นตอนที่ 3.3.1 โดยใช้ข้อมูลทางสถิติในการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นเตรียมสารอาหารที่เหมาะสมกำหนดสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 แล้วปรับพีเอชให้เป็นกลาง เติมเหล็กประจุศูนย์แบบฝอยขึ้น ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 g/kg TVS ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนของแฉ่งระเหย 0.5:1 ทำการบรรจุสารละลายในขวดหมักใล่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนนาน 3 นาทีก่อนปิดขวดให้สนิท ทำการหมักเป็นเวลา 60 วัน เมื่อทำการหมักครบตามเวลาที่กำหนดให้ทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย และนำไปตรวจซีโอดี, ของแฉ่งรวม, ของแฉ่งระเหย, ความเป็นด่าง (Alkalinity, A), อุณหภูมิ (Temperature), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), น้ำตาลรีดิวซ์, ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFA) ตามวิธีมาตรฐาน APHA, (2005), องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กประจุศูนย์ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Analysis (XRD), พื้นผิวของวัสดุ ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) และหาปริมาณของธาตุเหล็ก ด้วยเครื่อง Spectrophotometry รายละเอียดความถี่การเก็บตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.3 การทดลองทั้งหมดนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม ซึ่งใช้กากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส มาปรับพีเอชให้เป็นกลางและเติมสารละลายอาหารแล้วหมักกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ในการเก็บตัวอย่าง สำหรับการหมัก 60 วัน ทำการวัดปริมาณแก๊ส

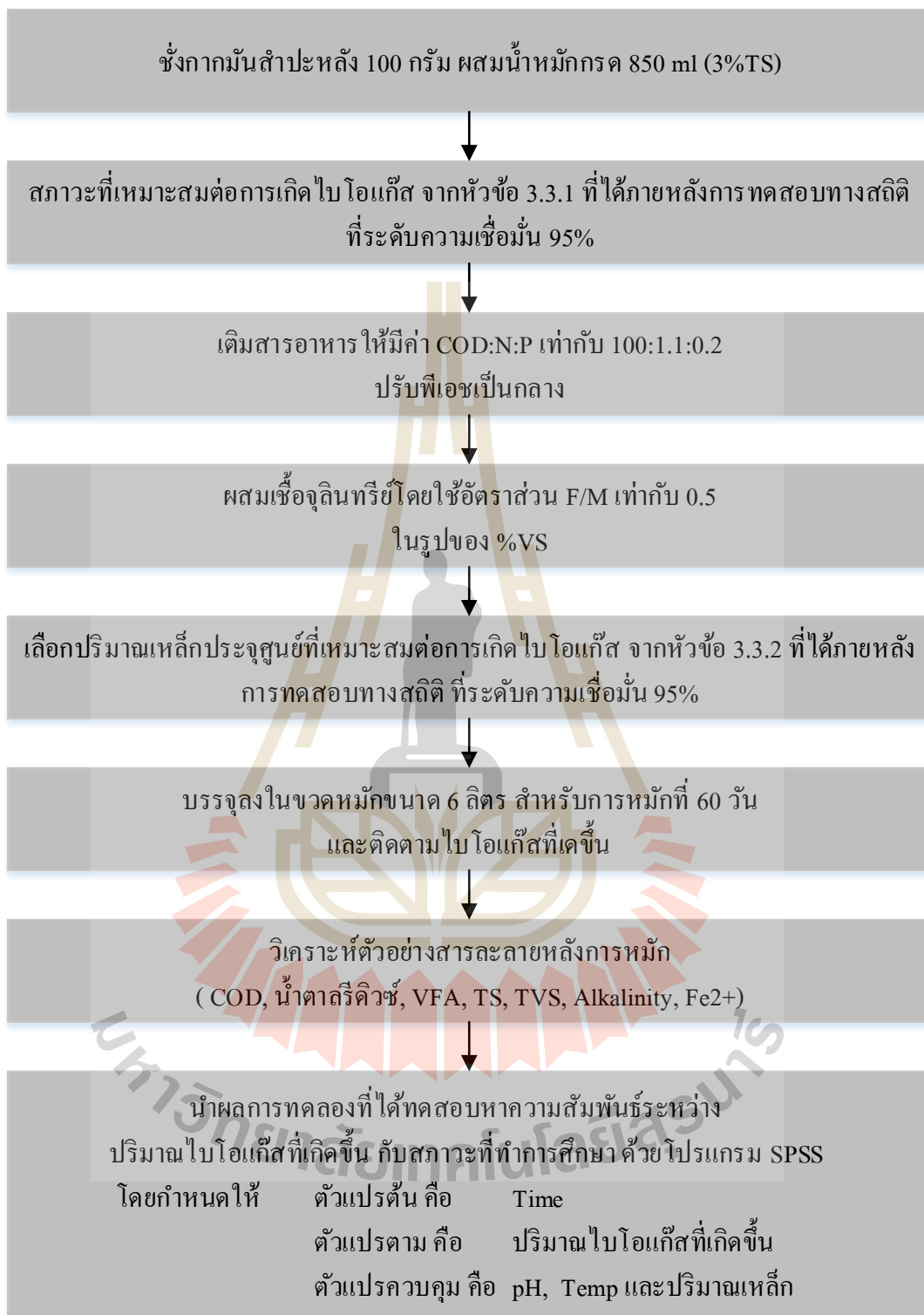


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเดินระบบเพื่อศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

3.3.2.3. ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

- ขั้นตอนในการเดินระบบ

ขั้นตอนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.5 เลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการเดินระบบและปริมาณหลักประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ ในขั้นตอนที่ 3.3.2 โดยทดสอบทางสถิติที่นัยสำคัญ 95% จากนั้นเตรียมสารอาหารที่เหมาะสมกำหนดสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 แล้วปรับพีเอชให้เป็นกลาง ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนของแข็งระเหย 0.5:1 ทำการบรรจุสารละลายในขวดหมักใล่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนนาน 3 นาทีก่อนปิดขวดให้สนิท ทำการหมักเป็นเวลา 60 วัน เมื่อทำการหมักครบตามเวลาที่กำหนดให้ทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย และนำไปตรวจซีโอดี, ของแข็งรวม, ของแข็งระเหย, ความเป็นด่าง (Alkalinity, A), อุณหภูมิ (Temperature), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), น้ำตาลรีดิวซ์, ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFA) ตามวิธีมาตรฐาน APHA, (2005), องค์กรประกอบทางเคมีของหลักประจุศูนย์ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Analysis (XRD), พื้นผิวของวัสดุ ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) และหาปริมาณของธาตุเหล็ก ด้วยเครื่อง Spectrophotometry ความถี่การเก็บตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.3 การทดลองทั้งหมดนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม ซึ่งใช้กากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส มาปรับพีเอชให้เป็นกลางและเติมสารละลายอาหารแล้วหมักกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ในการเก็บตัวอย่าง สำหรับการหมัก 60 วัน ทำการวัดปริมาณแก๊ส



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเดินระบบเพื่อศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

ตารางที่ 3.4 ความถี่ในการเก็บตัวอย่างและวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ช่วงเวลาการหมัก (วัน)	
		0	30
ซีโอดี	วิธี Clos Reflux Titrimetric method	/	/
น้ำตาลรีดิวซ์	วิธีเอ็นเอส	/	/
ของแข็งทั้งหมด	วิธีชั่งน้ำหนัก	/	/
ของแข็งระเหย	วิธีชั่งน้ำหนัก	/	/
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	/	/
กรดไขมันระเหยง่าย	วิธีกลั่น	/	/
อัลคาไลน์ตี	วิธีไทเทรต	/	/
ปริมาณเหล็ก (Fe^{2+})	วิธีสเปกโทรโฟโตเมตรี (Spectrophotometry)	/	/
องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กประจุนัย	ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง XRD	/	/
ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของวัสดุ	ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง FE-SEM	/	/

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS (Statistics Package for the Social Sciences) จากสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ เหล็กประจุนัยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดไบโอแก๊สได้ โดย นำผลที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistics) โดยการทดสอบสมมติฐาน (Test of hypotheses) เพื่อที่จะหาคำตอบมาอ้างอิงสมมติฐานที่ตั้งขึ้นมา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ ตั้งสมมติฐานทางสถิติ ได้แก่ สมมติฐานว่าง และสมมติฐานแย้ง กำหนดการทดสอบค่าสถิติ ได้แก่ ทดสอบค่าเฉลี่ยและทดสอบค่าความแปรปรวน คำนวณค่าสถิติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากนั้นสร้างเขตปฏิเสธสมมติฐาน เพื่อหาค่าวิกฤต (Critical value) และสรุปผลการทดสอบที่ได้ (Berthouex and Brown, 2002)

น้ำหนัก (A) นำ Crucible ที่มีตัวอย่างเข้าเครื่องสกัดใยอาหารหยาบ (Fibertec™2010, Auto Fibre Analysis System, Sweden) เติมสารละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 1.25% ลงใน column ปริมาตร 150 ml ให้ความร้อน ใช้เวลาในการย่อยตัวอย่าง 30 นาที เมื่อครบระยะเวลาย่อยให้ล้างตัวอย่างด้วยน้ำร้อนประมาณ 2-3 ครั้ง เติม NaOH เข้มข้น 1.25% ลงใน Column ปริมาตร 150 ml ให้ความร้อน ใช้เวลาในการย่อยตัวอย่าง 30 นาที เมื่อครบระยะเวลาย่อยให้ล้างตัวอย่างด้วยน้ำร้อนประมาณ 2-3 ครั้ง นำด้วย Crucible ที่มีตัวอย่าง ล้างด้วย 95% Ethanol ครั้งละ 10 ml ประมาณ 3 ครั้ง อบตัวอย่างที่ผ่านการย่อยในตู้อบอุณหภูมิ $105^\circ C$ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่ในโถดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่ (B) เผาตัวอย่างที่ผ่านการอบในเตาเผาอุณหภูมิ $550^\circ C$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาใส่ในโถดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่ (C) คำนวณหาปริมาณสารเยื่อใยหยาบจากน้ำหนัก(A), (B) และ (C)

$$\text{ปริมาณเยื่อใย (\%)} = \frac{(B-C)}{A} \times 100$$

3.5.1.3 ปริมาณเฮมิเซลลูโลส

ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดประมาณ 5 กรัม จากนั้นเติมอะซิโตน 80 ml ทำการสกัดด้วยวิธี Soxhlex extraction ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $90^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างด้วยอะซิโตนแล้วตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นำไปอบที่อุณหภูมิ $105^\circ C$ นาน 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่ในโถดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนักที่คงที่ (A) นำตัวอย่างที่ได้ประมาณ 0.3 กรัม เติม NaOH (0.5 mol/L) 3 ml จากนั้นนำไปอบที่ความร้อน $80^\circ C$ 3.5 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปกรองโดยใช้เครื่องแบบสุญญากาศ แล้วล้างด้วยน้ำจืดมี pH เป็นกลางนำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ $105^\circ C$ นำออกจากตู้อบ ใส่ในโถดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนักที่คงที่ (B)

$$\text{ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (\%)} = \frac{(A-B)}{A} \times 100$$

3.5.1.4 ปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน

ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดประมาณ 1 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 600 ml เติมสารละลาย Acid detergent 100 ml และ Decahydronaphthalene 2 ml ให้ความร้อนโดยตั้งให้เดือด 10 นาที หลังจากนั้นลดความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อให้ความร้อนเสร็จนำไปกรองใน กระดาษกรองที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ล้างตัวอย่างที่ค้างอยู่ด้วยความร้อน นำกระดาษกรองพร้อมตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ

105 °C นาน 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่น้ำในโถดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนักที่คงที่ (A) นำกระดาษกรองที่มีตัวอย่างแล้วมาเติมสารละลาย H_2SO_4 72% แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 8 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่น้ำในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักที่คงที่ (B) นำกระดาษกรองพร้อมตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C นาน 2 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่น้ำในโถดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนักที่คงที่ (C)

$$\text{ปริมาณ Acid detergent fiber (\%)} = \frac{(A - \text{น้ำหนักของกระดาษกรอง})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{ปริมาณลิกนิน (\%)} = \frac{(B - C)}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{ปริมาณเซลลูโลส (\%)} = \text{ปริมาณ Acid detergent fiber (\%)} - \text{ปริมาณลิกนิน (\%)}$$

3.5.1.5 ปริมาณความชื้น (Moisture)

หาปริมาณความชื้นของกากมันสำปะหลังตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992) โดยอบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง อบและชั่งจนได้น้ำหนักคงที่ ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 5 กรัม ใสลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักอบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่น้ำในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้ง ครั้งละประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่คำนวณปริมาณความชื้น

3.5.1.6 การวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ทำการปิเปตสารละลายตัวอย่าง ใส่น้ำในหลอดทดลองปริมาณ 1 ml จากนั้นทำการเติมสาร DNS reagent ลงในหลอดทดลองปริมาณ 1 ml ลงในแต่ละหลอด และผสมให้เข้ากัน นำหลอดทั้งหมดไปตั้งไว้ใน boiling bath เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำให้เย็นลงโดยย้ายมาตั้งไว้ใน ice bath เดิมทีปริมาณ 10 ml ลงในแต่ละหลอด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยใช้หลอดน้ำกลั่นเป็นตัวเปรียบเทียบ นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

3.5.1.7 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)

ตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำหมักไบโอแก๊สตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992) และวิธีดัดแปลงของ Zhang and Zhang, (1999) โดยการอบภาชนะในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะถึงที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ซึ่งตัวอย่างน้ำหมักปริมาตร 50 ml ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนที่บรรจุในภาชนะ หาความชื้นที่ทราบน้ำหนัก อบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่ในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้งๆละประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมด

3.5.1.8 ของแข็งระเหยได้ (Volatile solids, VS)

วัดปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992)

3.5.1.9 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFA)

การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายได้ (Volatile fatty acids, VFA) โดยการกลั่นด้วยวิธี Direct titration method นำของเหลวส่วนที่ใส่ปริมาตร 100 ml เดิมลงไปใน boiling flask เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml ลงไปผสมกัน ใช้ปิเปตดูดกรด H_2SO_4 (1:1) เดิมลงไป 5.0 ml เมื่อกลั่นครบ 30 นาที หรือจนของเหลวใน boiling flask ลดลงมากให้หยุดกลั่น หยด Phenolphthalein 5 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับ 0.1 M NaOH

3.5.1.10 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)

หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดตามหลักการ Infrared radiation detection และ Thermal conductivity detection ด้วยเครื่อง CNS-2000 Elemental Analyze ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992)

3.5.1.11 ปริมาณฟอสฟอรัส (Phosphorus)

เตรียมตัวอย่างกากมันสำปะหลังสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธี Wet digestion method และตรวจวัดปริมาณฟอสฟอรัสในตัวอย่างด้วยวิธี Vandomolybdate

method ตาม Barton, (1948) โดยนำตัวอย่างปริมาตร 5 ml ลงใน Volumetric flask ขนาด 25 ml เติม น้ำยา Barton ปริมาตร 5 ml เขย่าให้เข้ากัน ปรับปริมาตรให้เป็น 25 ml ด้วยน้ำกลั่นและตั้งทิ้งไว้ให้ การเกิดสีสมบูรณ์ประมาณ 30 นาที วัดความเข้มข้นของสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยปริมาณฟอสฟอรัสได้จากการคำนวณจากกราฟมาตรฐานที่ ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน

3.5.1.12 วิเคราะห์ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD₅)

การหาค่าบีโอดีเป็นวิธีการทางชีววิเคราะห์ (Bioassay) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการวัดค่า ออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ย่อยสารอินทรีย์ในน้ำภายใต้สภาวะที่เหมือนกับที่เกิดในธรรมชาติมากที่สุด เพื่อที่จะให้การวิเคราะห์เป็นปริมาณวิเคราะห์จึงต้องทำให้ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่ออัตราการย่อย สลายคงที่ นั่นคือ ค่าบีโอดีมาตรฐานจะใช้บ่มที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 5 วัน สาเหตุที่ใช้อุณหภูมิ และเวลาดังกล่าวก็เพราะที่อุณหภูมิ 20 °C nitrifying bacteria เจริญเติบโตได้ช้าที่อุณหภูมินี้ ส่วน การเลือกใช้เวลาบ่ม 5 วัน ก็เพราะถ้าใช้เวลามากกว่านี้ การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียจะ เกิดขึ้นน้อยมาก และเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ออกซิเจนในการออกซิไดส์สารประกอบไนโตรเจนโดย autotrophic bacteria ในกลุ่ม nitrifying bacteria การเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้ที่ 20 °C มีน้อย มาก ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียกลุ่มนี้ใช้ใน ช่วง 5 วันแรกจึงมีน้อยมาก ค่าบีโอดีที่ใช้เวลา บ่ม 5 วัน ใช้สัญลักษณ์ BOD₅ ด้วยวิธี dilution method

3.5.2 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของจุลินทรีย์

3.5.2.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)

ตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำหมักไบโอแก๊สตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992)

3.5.2.2 ของแข็งระเหยได้ (Volatile solids, VS)

วัดปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992)

3.5.3 วิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

3.5.2.1 การวิเคราะห์ค่า COD

ด้วยวิธี Close Reflux Titrmetric Method ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992)

3.5.2.2 การวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ทำการปิเปตสารละลายตัวอย่าง ใส่ในหลอดทดลองปริมาณ 1 ml จากนั้นทำการเติมสาร DNS reagent ลงในหลอดทดลองปริมาณ 1 มิลลิตร ลงในแต่ละหลอด และผสมให้เข้ากัน นำหลอดทั้งหมดไปตั้งไว้ใน boiling bath เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำให้เย็นลงโดยย้ายมาตั้งไว้ใน ice bath เติมกลั่นปริมาณ 10 ml ลงในแต่ละหลอด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยใช้หลอดน้ำกลั่นเป็นตัวเปรียบเทียบ นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

3.5.2.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)

ตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำหมักไบโอแก๊สตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for

3.5.2.4 ของแข็งระเหยได้ (Volatile solids, VS)

วัดปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992)

3.5.2.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักไบโอแก๊สด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, Mettler delta 320, Mettler-Toledo Ltd., England)

3.5.2.6 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFA)

การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายได้ (Volatile fatty acids, VFA) โดยการกลั่นด้วยวิธี Direct titration method นำของเหลวส่วนที่ใสปริมาตร 100 ml เติมลงไปใน boiling flask เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml ลงไปผสมกัน ใช้ปิเปตดูดกรด H_2SO_4 (1:1) เติมลงไป 5.0 ml เมื่อกลั่น

ครบ 30 นาที หรือจนของเหลวใน boiling flask ลดลงมากให้หยุดก่อกวน หยด Phenolphthalein 5 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับ 0.1 M NaOH

3.5.2.7 ความเป็นด่าง (Alkalinity, A)

วัดค่าความเป็นด่างด้วยวิธี Titration method ด้วย H₂SO₄ เข้มข้น 0.1 N จนถึงค่าความเป็น กรด-ด่างที่ 5.1, 4.3 และ 3.5 ตามลำดับ ตามวิธีมาตรฐาน AOAC International, (2000) ค่า Alkalinity แสดง ค่าในรูปมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg as CaCO₃ /L) ในขณะที่ ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายง่าย แสดงค่าในรูปมิลลิกรัมต่อลิตรของอะซิเตท (mg as Acetate/L)

3.5.2.8 ปริมาณเหล็ก (Fe²⁺)

เก็บตัวอย่างน้ำแล้วนำมากรอง จากนั้นเปิดน้ำตัวอย่างมา 10 ml ใส่ในขวดวัด ปริมาตรขนาด 25 ml เติม hydroxylamine จำนวน 0.5 ml เติม 1,10-phenanthroline จำนวน 4.0 ml แล้วเติม สารละลายบัฟเฟอร์ 2.5 ml จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 25.0 ml ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที ก่อนนำไป วัดค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 510 nm คำนวณหาความเข้มข้นของ Fe²⁺ ในตัวอย่างน้ำเป็น mg/L

3.5.2.9 ปริมาณไบโอแก๊ส (Biogas volume)

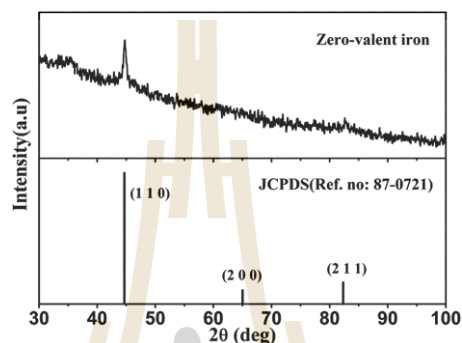
วัดปริมาณไบโอแก๊สที่ผลิตได้ด้วยการแทนที่น้ำของแก๊สที่ผลิตได้

3.5.2.10 ทดสอบพื้นผิวของเหล็กประจุศูนย์ด้วยเครื่อง FE-SEM

Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ก่อตั้งจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิสชัน เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ในการ ตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปร่างของอนุภาค และลักษณะการกระจายของเฟสใน โครงสร้างจุลภาค

3.5.2.11 ทดสอบลักษณะทางเคมีของเหล็กประจุศูนย์ด้วยเครื่อง XRD

การยืนยันองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กประจุศูนย์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) โดยเปรียบเทียบ XRD pattern กับ Standard ดังแสดงในรูปที่ 3.5 พบว่า XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ตำแหน่ง 45°



รูปที่ 3.5 XRD Standard สำหรับเหล็กประจุศูนย์

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล

ดำเนินการทดลองแบบกะ (Batch Test) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลและหาความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 4.1 ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส และส่วนที่ 4.2 ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 4.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS ขั้นตอนที่ 4.2.2 ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส และขั้นตอนที่ 4.2.3 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย ที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส

จากการศึกษาของ กิตติกานท์ สุขวานิชย์ (2554) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าหาปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ในรูปของของแข็งทั้งหมด 3%TS ด้วยกรด H_2SO_4 และเบส NaOH ซึ่งทำโดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ที่นัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่เลือกศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ pH (pH 0 – 13) อุณหภูมิ (60, 80, 100 °C) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (30, 60, 90 นาที) ดัชนีที่ใช้ในการประเมิน ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่าย ผลจากการศึกษาพบว่า pH มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าปัจจัยร่วมระหว่าง pH และอุณหภูมิ มีค่ามากกว่าปัจจัยร่วมอื่นๆ กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็น 30, 60 หรือ 90 นาที ก็ไม่มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่าย แสดงว่า ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ก็ให้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายเท่ากับ การใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที หรือ 90 นาที และ จากการศึกษาค้นคว้าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังใน Covered

Lagoon ของโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ร่วมกับบริษัท เล็งสาางพัฒนาพลังงาน จำกัด (2558) ได้ทำการศึกษาปัจจัยของ pH 1 - 13 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที สำหรับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังในรูปของของแข็งทั้งหมด 1.67%TS, 3%TS และ 5%TS เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่าย พบว่า pH มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าปัจจัยร่วมระหว่าง pH และอุณหภูมิมีค่ามากกว่าปัจจัยร่วมอื่นๆ และความเข้มข้นของน้ำหมักกรดต่อกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอแก๊สที่สุด ที่ความเข้มข้น 3%TS จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังไม่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส

เนื่องจากการศึกษาดังกล่าว การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย ที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส โดยการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 1 - 13 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังในรูปของของแข็งทั้งหมด 3%TS

4.1.1 องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง

องค์ประกอบของกากมันสำปะหลังแตกต่างกันตามคุณภาพของหัวมันสำปะหลัง และประสิทธิภาพในการสกัดแป้งในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังของแต่ละโรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) องค์ประกอบของกากมันสำปะหลังแห่งที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.1 – 4.2

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

เอกสารอ้างอิง	ส่วนประกอบ (กากเปียก 100 กรัม)					
	แป้ง(%)	ความชื้น(%)	เถ้า(%)	โปรตีน(%)	เยื่อใย(%)	ไขมัน (%)
ผลจากการทดลอง (2560)	46.70	76.27	5.04	-	14.50	-
ปรีดา และคณะ (2552)	47.97	88.60	5.73	3.42	14.75	0.50
สุเมธ และคณะ (2552)	50.20	89.12	5.32	2.35	14.57	0.53
วีรยา และคณะ (2552)	50.10	89.50	2.37	0.39	13.99	5.73
ไกรวุติ พ่วงเพชร (2550)	66.22	97.79	2.65	3.39	15.26	0.24
Khempaka et al. (2009)	53.55	93.22	2.83	1.98	13.59	0.13

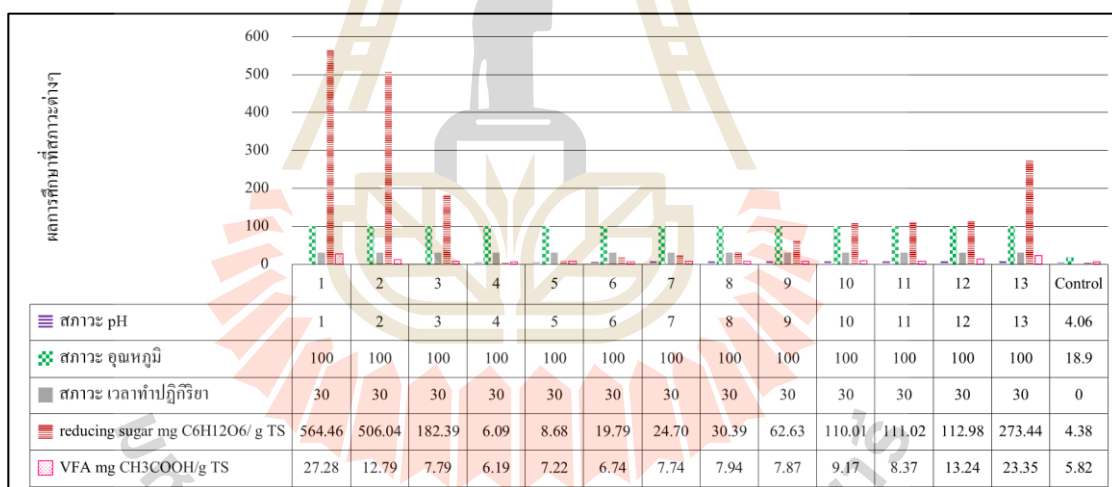
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

เอกสารอ้างอิง	ส่วนประกอบภายในกากมันสำปะหลัง (%)				
	แป้ง	ไฟเบอร์	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ผลจากการทดลอง (2560)	46.7	14.5	4.8	9.8	10.6
ชงชาติ สุริยวงศ์ (2556)	50.2	9.2	3.3	10.2	11.4
กัลยา อยู่นาน (2546)	33.7	14.4	12.4	4.6	10.5
Ali et al. (2011)	47.9	20.1	8.1	2.8	2.2
Rattanachomsri et al. (2009)	53.5	23	15.6	4.6	2.8
Suksombat et al. (2006)	50.1	6.6	5.9	27.8	3.9

*ใช้กากมันสำปะหลังสด 100 กรัม

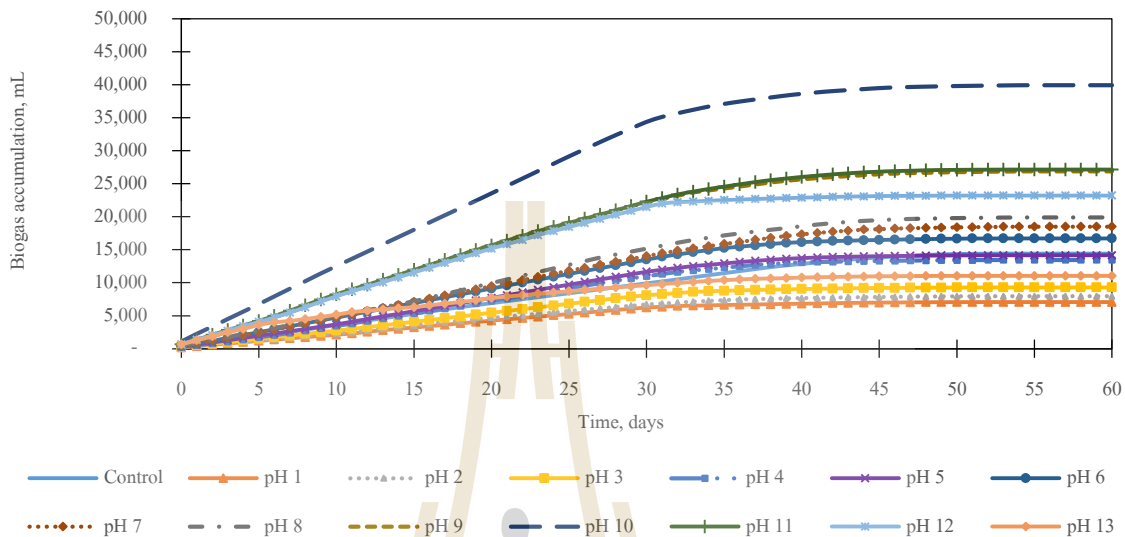
4.1.2 ผลการศึกษา pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย

ผลจากการทดลอง การหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้น ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 1-13, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณกากมันสำปะหลังสดที่ใช้คือ 100 กรัม ต่อปริมาณน้ำหมักกรด 850 ml เมื่อทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบส ปริมาตรรวมของสารตัวอย่าง ประมาณ 950 ± 20 ml ซึ่งปริมาณกากมันสำปะหลังสดต่อน้ำหมักกรดที่ใช้ มีความเข้มข้นในรูปของของแข็งทั้งหมด 3%TS แสดงดังรูปที่ 4.1 จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 6.09 – 564.46 mg $C_6H_{12}O_6$ /g TS ส่วนกรดไขมันระเหยง่าย อยู่ในช่วง 6.19 – 27.28 mg CH_3COOH /g TS ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการศึกษา ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการเกิด ไบโอดีแก๊สในขั้นตอนถัดไป จึงได้มีการนำปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจากทุกสภาวะไปทำการศึกษา เนื่องจากปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะมีค่าไม่แตกต่างกัน

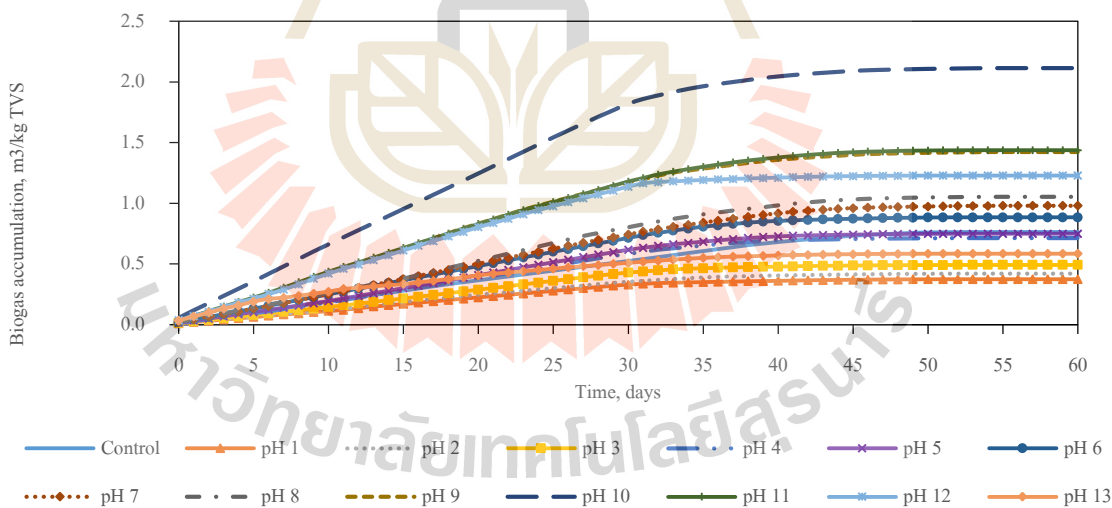


รูปที่ 4.1 การเกิดน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3% TS ด้วยกรดและเบสที่ pH 1 - 13, อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.1.3 ผลของการเกิดไบโอแก๊สเนื่องจากกรดไขมันระเหยง่าย



(ก) ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน



(ข) อัตราการเกิดไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน

รูปที่ 4.2 (ก) ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ข) อัตราการเกิดไบโอแก๊สสะสม สำหรับการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดและเบส ที่ pH 1 – 13 , อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

จากกราฟรูปที่ 4.2 เป็นการทดสอบผลของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นภายหลังการไฮโดรไลซิส ต่ออัตราการเกิดไบโอแก๊ส ที่ระยะเวลาในการหมัก 60 วัน จะพบว่าปริมาณไบโอแก๊สสะสมและอัตราการเกิดไบโอแก๊ส ที่สภาวะควบคุม ที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยากับกรดเบสใดๆ ปรับ pH ให้เป็นกลาง เติมสารละลายอาหารแล้วหมักกับเชื้อจุลินทรีย์ใน อัตราส่วนที่เท่ากับกับ pH อื่นๆ จะเห็นว่าอัตราการเกิดไบโอแก๊ส คือ $0.763 \text{ m}^3/\text{kg TVS}$ สำหรับสภาวะที่มีการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ด้วยกรดและเบส, อุณหภูมิ 100°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จะพบว่าที่ pH 10 มีแนวโน้มอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มมีอัตราการผลิตไบโอแก๊สคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน ซึ่งมีอัตราการผลิตไบโอแก๊สมีค่ามากกว่าที่ pH อื่นๆ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดของแต่ละค่า pH จะพบว่าที่ pH 10 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดที่สุดคือ $2.115 \text{ m}^3/\text{kg TVS}$ และมีค่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าสภาวะควบคุม 177.61%, pH 1 465.91%, pH 2 402.95%, pH 3 330.67%, pH 4 197.47%, pH 5 182.55%, pH 6 139.51%, pH 7 116.27%, pH 8 101.05%, pH 9 48.82%, pH 11 47.39%, pH 12 72.46% และ pH 13 262.41% และจากการทดสอบทางสถิติฐานโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ที่นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะพบว่า pH 10 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดแตกต่างจากทุกๆสภาวะ แสดงดังตารางที่ 4.3 - 4.4 จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังคือ pH 10 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ได้จากการทดลอง มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าวิจัยของ บริษัท เสิ่งสาพัฒนาพลังงาน จำกัด (2558), กิตติกันท์ สุขวานิชย์ (2554), กิตติยาพร สมบูรณ์ (2554), สิริวรรณ แก้วชิงดวง (2554) และพิชชา สายสมและคณะ (2551) ซึ่งมีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

บริษัท เสิ่งสาพัฒนาพลังงาน จำกัด (2558) ได้ทำการศึกษการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังในระบบ Covered Lagoon ทำการศึกษาปัจจัยของ pH 0 และ pH 2 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที สำหรับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังในรูปของของแข็งทั้งหมด 1.67%TS, 3%TS และ 5%TS เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของน้ำหมักกรดต่อกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอแก๊สที่สุด ที่ความเข้มข้น 3%TS ภายหลังการหมักที่เวลา 30 วัน ชุดควบคุมให้อัตราการผลิตไบโอแก๊ส $0.129 \text{ m}^3/\text{kg TVS}$ การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%TS ที่ pH 2, อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 นาที ให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุด $0.4017 \text{ m}^3/\text{kg TVS}$ ซึ่งมากกว่าชุดควบคุม 211.40%

กิตติกันท์ สุขวานิชย์ (2554) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยสารกรดและด่าง ผลจากการศึกษาพบว่า pH ของ

สารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมรรถนะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรดและสารด่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิซ์และกรดไขมันระเหยง่าย คือ การไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ค่า pH 0 อุณหภูมิ 100 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิซ์และกรดไขมันระเหยง่ายเท่ากับ 855 และ 60.3 mg/g TS ตามลำดับ โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิซ์และกรดไขมันระเหยง่ายถึง 214 และ 20 เท่าจากระดับเริ่มต้น ในส่วนของการไฮโดรไลซิสด้วยด่างพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิซ์สูงสุดมีค่าต่ำกว่าของการไฮโดรไลซิสด้วยกรดอย่างมาก สำหรับการผลิตไบโอแก๊สโดยปริมาณแก๊สสะสมภายหลังการหมัก 30 วัน พบว่า ในสภาวะควบคุม มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 0.419 m³/kg TS และการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารด่างที่ pH 13 อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 90 นาที ก่อนนำไปหมักแก๊ส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สได้อย่างเด่นชัด 1.205 m³/kg TS ซึ่งมากกว่าชุดควบคุม 187.59% ซึ่งในส่วนของ การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิซ์และกรดไขมันระเหยง่ายสูงสุดนั้น กลับให้แก๊สในปริมาณต่ำโดยมีค่าต่ำกว่าของกรณีการไฮโดรไลซิสที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซิส

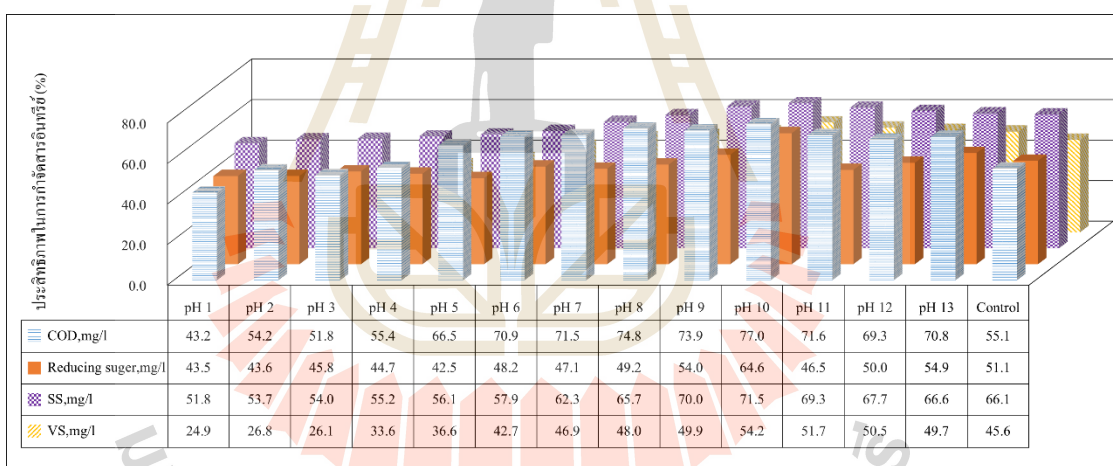
กิตติยาพร สมบูรณ์ (2554) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมเซลลูเลสและเพคตินเนส โดยใช้สารละลายกากมันสำปะหลัง 2%TS ภายหลังจากการหมัก 30 วัน พบว่า ที่สภาวะควบคุมให้ปริมาณไบโอแก๊สสะสมเฉลี่ย 0.182 m³/kg TS หรือ 0.029 m³/kg กากเปียก ในขณะที่สภาวะที่มีการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ก่อนการหมัก ทุกสภาวะให้ปริมาณไบโอแก๊สสะสมเฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.339 - 0.391 m³/kg TS หรือ 0.033 - 0.062 m³/kg กากเปียก โดยสภาวะที่ให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดคือ pH 6, เอนไซม์ผสมเซลลูเลส 30 NCU/g TS, เอนไซม์ผสมเพคตินเนส 50 NCU/g TS และเวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง

สิริวรรณ แก้วชิงดวง (2554) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลรีดิซ์จากกากมันสำปะหลังเข้มข้น 2%TS โดยการบำบัดขั้นต้น ด้วยกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 60 นาที ผลจากการศึกษาพบสามารถผลิตน้ำตาลรีดิซ์ได้เท่ากับ 831.90 mg/g TS และผลิตไบโอแก๊สได้ 0.250 m³/kg TS

พิชชา สวดยสมและคณะ (2551) ซึ่งได้ทำการศึกษาสมรรถนะการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ผสมเซลลูเลส 5 - 20 NCU/g TS และเพคตินเนส 5 - 125 PGU/g TS ที่ pH 4.5 เป็นเวลา 30 นาที กลับพบว่า การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังก่อนการหมักแก๊สนั้น ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างไบโอแก๊สได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ปริมาณแก๊สสะสมภายหลังการหมัก 30 วันในช่วง 0.034 - 0.047 m³/kg TS

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการศึกษา การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตไบโอแก๊ส ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังต่อน้ำหมักกรดต่างๆ

การศึกษา	ไฮโดรไลซิสด้วย	ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังแบ่งมันสำปะหลัง	อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่สภาวะควบคุม	อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดที่ผลิตได้
บ.เสิงสางพัฒนาพลังงาน จำกัด (2558)	กรด (H ₂ SO ₄) เบส (NaOH)	3%TS	0.132 m ³ /kg TVS	0.317 m ³ /kg TVS
กิตติกานท์ สุขวานิชย์ (2554)	กรด (H ₂ SO ₄) เบส (NaOH)	3%TS	0.419 m ³ /kg TS	1.205 m ³ /kg TS
กิตติยาพร สมบูรณ์ (2554)	เอนไซม์ผสมเซลลูเลสและเพคติเนส	2%TS	0.182 m ³ /kg TS	0.339-0.391 m ³ /kg TS
สิริวรรณ แก้วชิงดวง (2554)	กรด (H ₂ SO ₄)	2%TS	0.020 m ³ /kg TS	0.250 m ³ /kg TS
พิชชา สวยสมและคณะ (2551)	เอนไซม์เซลลูเลส	3%TS	0.012m ³ /kg TS	0.034-0.047 m ³ /kg TS



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%) pH ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

จากรูปที่ 4.3 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD อยู่ในช่วง 43.18 - 76.98% น้ำตาลรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 42.49 - 64.65% ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) อยู่ในช่วง 51.83 - 71.71% และของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) อยู่ในช่วง 24.92 - 54.22% โดยที่ในสภาวะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุด

4.1.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ

ทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูล ด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลาในการหมัก 60 วัน และทำการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparison) เพื่อหาผู้ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ (Post hoc test) โดยใช้วิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่มีมากกว่าสองค่า (Levin, 1983 และ Chase, 1968) กล่าวคือ มีตัวแปรอิสระ 1 ตัว ซึ่งเรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน นั้น สมมติฐานไร้นัยสำคัญ (Null hypothesis) จะกำหนดให้ค่าเฉลี่ยของประชากรแต่ละกลุ่มมีค่าเท่ากัน ทดสอบสมมติฐานทางเลือก (Alternative hypothesis) กำหนดให้ว่าจะมีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ ที่แตกต่างกัน เขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

สมมติฐานทางสถิติ : $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$
 $H_1 :$ อย่างน้อยเฉลี่ย 2 ค่า หรือ 1 คู่ แตกต่างกัน

เมื่อ

H_0 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05

H_1 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ที่นัยสำคัญ 0.05

μ คือ ค่าเฉลี่ยของไบโอแก๊สแต่ละกลุ่มการศึกษา

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุด เทียบกับการผลิตไบโอแก๊สที่ pH อื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant
Between Groups	25773809.274	13	1982600.713	571.565	.000
Within Groups	1456862.903	420	3468.721		
Total	27230672.177	433			

จากตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติ พบว่า มีค่า Significant = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าการศึกษานี้ ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 คือ อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ pH ต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน จึงมีการทดสอบ Post hoc test ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly เพื่อหาว่าคู่ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิตไบโอแก๊สแตกต่างกัน โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

(I) pH	(J) pH	Significant	(I) pH	(J) pH	Significant	(I) pH	(J) pH	Significant
Cont.	pH 1	0.000	pH 10	Cont.	0.000	pH 11	Cont.	0.000
	pH 2	0.000		pH 1	0.000		pH 1	0.000
	pH 3	0.008		pH 2	0.000		pH 2	0.000
	pH 4	0.511		pH 3	0.000		pH 3	0.000
	pH 5	0.013		pH 4	0.000		pH 4	0.000
	pH 6	0.000		pH 5	0.000		pH 5	0.000
	pH 7	0.000		pH 6	0.000		pH 6	0.000
	pH 8	0.000		pH 7	0.000		pH 7	0.000
	pH 9	0.000		pH 8	0.000		pH 8	0.000
	pH 10	0.000		pH 9	0.000		pH 9	1.000
	pH 11	0.000		pH 11	0.000		pH 10	0.000
	pH 12	0.000		pH 12	0.000		pH 11	0.914
	pH 13	1.000		pH 13	0.000		pH 12	0.000

* Cont. คือ Control (ชุดควบคุม)
(อ้างอิงจากผลการศึกษาในภาคผนวก)

จากตารางที่ 4.45 ผลการทดสอบ Post hoc test ของแต่ละกลุ่มตัวอย่างเทียบกับด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) จะพบว่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ pH 10 เป็นเพียงสถานะเดียว ที่มีค่า Significant = 0.000 หรือ น้อยกว่า 0.05 เมื่อเทียบกับทุกการทดลอง หมายความว่า การย่อยสลายกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เวลา 30 นาที มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุด แตกต่างจากทุกสถานะ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังคือ การย่อยสลายกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เวลา 30 นาที

4.2 ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันลำปะหลัง

4.2.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS

4.2.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

เหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาคือฝอยเหล็ก มีลักษณะเส้นเล็กเรียวยาว สีเทา รูปร่างคล้ายฝอยขัดหม้อ ดังรูปที่ 4.4 ขนาดชิ้นงาน กว้างxยาวxหนา (0.168 mm x 10 mm x 0.005 mm) ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษารุ่นนี้ มีลักษณะของชิ้นงานแตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆ เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษา การเพิ่มประสิทธิภาพไบโอแก๊สจากน้ำเสีย โดยทั่วไป มีการใช้เหล็กประจุศูนย์ ในรูปของ เหล็กประจุศูนย์แบบผงความบริสุทธิ์ $\geq 98\%$ (Karri et al., 2005 ; Liu et al., 2012; Meng et al., 2013 ; Feng et al., 2014 ; Zhang et al., 2015 ; Wu et al., 2015 and Hao et al., 2017) เหล็กประจุศูนย์แบบผงที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม ความบริสุทธิ์ $\geq 95\%$ (Zhu et al., 2014 ; Zhang et al., 2015; Zhen et al., 2015; Suanon et al., 2017 and Kong et al., 2017) เหล็กประจุศูนย์แบบชิ้นที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม (Zhang et al., 2015; Liu et al., 2015; Zhen et al., 2015 and Kong et al., 2016) และเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโน (Suanon et al., 2017) แสดงดังตารางที่ 4.6



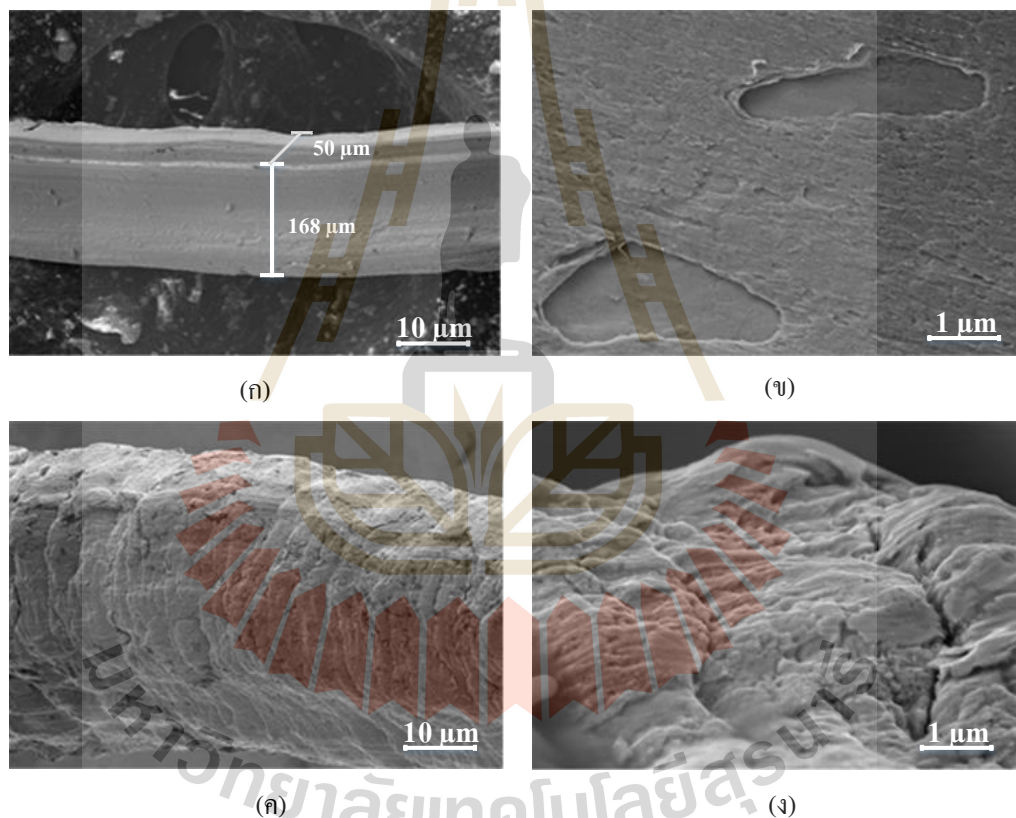
รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของฝอยเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 4.6 ชนิด ขนาด และความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ ที่ใช้ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊ส

อ้างอิง (ปีที่ศึกษา)	วัสดุที่ใช้	ขนาด	ความเข้มข้น	ลักษณะน้ำเสีย	สภาวะควบคุม (ไม่เติมเหล็ก)	ไบโอแก๊สที่เกิดขึ้น
Kong et al. (2017)	ผงเหล็กจาก อุตสาหกรรม	ความบริสุทธิ์ > 98%, \varnothing 0.2 mm , พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET	400 g Fe/kg VSS	วัสดุเหลือทิ้งจาก ครัวเรือน	0.220 – 0.240 m ³ /kg TVS	0.715 m ³ /kg TVS
Hao et al. (2017)	ผงเหล็ก	ความบริสุทธิ์ > 98%, \varnothing 0.2 mm , พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET	500 g Fe/kg TSS	ตะกอนน้ำเสียที่อยู่ใน สภาวะ mesophilic	0.1250 m ³ /kg VSS	0.2200 m ³ /kg VSS
Kong et al. (2016)	เศษเหล็กจาก อุตสาหกรรม	ความบริสุทธิ์ > 98%, กว้างxยาว (1 cm x 2 cm)	400 g Fe/kg VSS	วัสดุเหลือทิ้งจาก ครัวเรือน	0.0584 m ³ /kg TVS	0.380 m ³ /kg TVS
Zhen et al. (2015)	เศษเหล็กจาก อุตสาหกรรม	กว้างxหนา (2 mm x 0.35 mm)	1000 g Fe/kg VSS	น้ำเสียจากการบำบัดขั้นที่ สอง	0.1264 m ³ /kg VSS	0.1749 m ³ /kg VSS
Wu et al. (2015)	ผงเหล็ก	ความบริสุทธิ์ > 98%, อนุภาค ขนาด 400 mesh, พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.167 m ² /g BET	2,630 g Fe/kg VSS	น้ำขุ่นผสมน้ำจากถัง ตกตะกอน	0.0486 m ³ /kg VSS	0.1393 m ³ /kg VSS
Zhang et al. (2015)	ผงเหล็ก	ความบริสุทธิ์ > 98%, \varnothing 0.2 mm , พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET	1000 g/kg VSS	ตะกอนน้ำเสียโรงงาน	0.2015 m ³ /kg VSS	0.2968 m ³ /kg VSS
Feng et al. (2014)	ผงเหล็ก	ความบริสุทธิ์ > 98%, \varnothing 0.2 mm , พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET	1400 g Fe/kg TSS	ตะกอนน้ำเสียโรงงาน	0.1926 m ³ /kg VSS	0.2764 m ³ /kg VSS
Zhang et al. (2014)	ผงเหล็กและเศษเหล็ก จากอุตสาหกรรม	ความบริสุทธิ์ >98%, \varnothing 0.2 mm , พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.05 m ² /g BET ความบริสุทธิ์ > 95%, กว้างxยาว xหนา (8 mm x 4 mm x 0.5 mm)	100 g Fe/kg TSS	ตะกอนน้ำเสียโรงงาน	0.1458 m ³ /kg VSS	ผงเหล็ก 0.2651 m ³ /kg VSS เศษเหล็ก 0.2799 m ³ /kg VSS

4.2.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

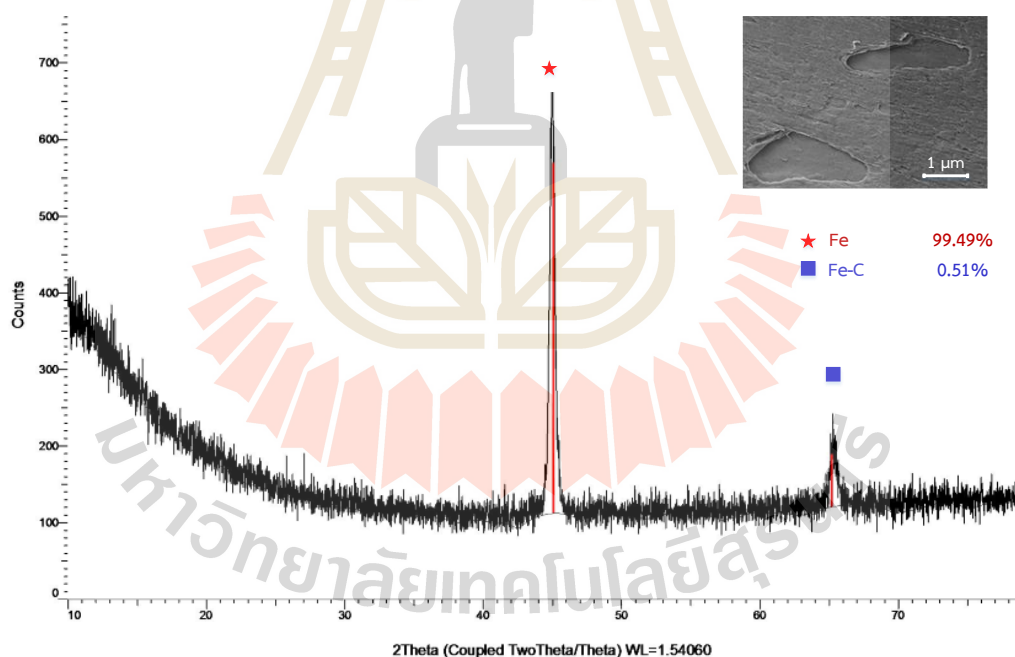
จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฝอยเหล็ก เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานเรียบ ประกอบไปด้วยชั้นของเหล็กหลายๆชั้น เรียงซ้อนกันอยู่ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของสแลคในเฟอร์ไรท์ (ทิศทางการรีด) หรือสแลคจะเรียงตัวเป็นชั้นไฟเบอร์ขนานไปกับทิศทางการรีด (พรวสา วงศ์ปัญญา, 2551) บริเวณพื้นผิวยังไม่เกิดการกัดกร่อนหรือเกิดการออกซิไดส์ เคนส์โทนสว่างคือเลขอะตอมมิกสูงหรือเป็นกลุ่มธาตุหนัก เช่น เหล็ก (Fe) เคนส์โทนมืดคือเลขอะตอมมิกต่ำ หรือเป็นกลุ่มธาตุเบา เช่น คาร์บอน (C) (Sidney, 1997) ดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฝอยเหล็กที่ใช้ในการศึกษา เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) (ก) ภาพด้านบน (Top View) ของชิ้นงานที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ภาพด้านบน (Top View) ของชิ้นงานที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ค) ภาพด้านข้าง (Side View) ของชิ้นงานที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) ภาพด้านข้าง (Side View) ของชิ้นงานที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

4.2.1.3 ลักษณะทางเคมี

เนื่องจากลักษณะทางกายภาพ ยังไม่สามารถบอกได้ว่าเหล็กที่ใช้ในการศึกษา เป็นเหล็กประเภทใด การยืนยันองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กประจุนุ่นด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ของ BRUKER axs รุ่น D8 ADVANCE เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ศึกษาเกี่ยวกับ โครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ซึ่งแสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กประจุนุ่นที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ โปรแกรม TOPAS ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า XRD pattern ของฝอยเหล็ก จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta ที่ตำแหน่ง 45 Theta เช่นเดียวกับการศึกษาของ Zise et al. (2007), Su et al. (2013), Hua et al. (2015) ซึ่งเป็นตำแหน่งของเหล็กประจุนุ่น (Zero valent iron; Fe^0) เมื่อเทียบกับ Standard pattern ประกอบไปด้วย เหล็กประจุนุ่น (Fe^0) ประมาณ 99.49% และ Fe-C ประมาณ 0.51% มีคาร์บอนน้อยกว่า 0.80 % เรียกว่า เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (HypoEutectoid Steels) ความสามารถในการกัดกร่อนดี เกิดสนิมเหล็กได้ง่าย (พรวสา วงศ์ปัญญา, 2551)



รูปที่ 4.6 XRD pattern ของฝอยเหล็กที่ใช้ในการศึกษา จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta ประมาณ 45 Theta ซึ่งเป็นตำแหน่งของเหล็กประจุนุ่น (Zero valent iron; Fe^0) เมื่อเทียบกับ Standard pattern

4.2.1.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์

จากการศึกษาการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดและเบสมีผลต่อการเกิดไบโอแก๊สที่เพิ่มขึ้น แต่ยังไม่มีการศึกษาร่วมกับเหล็กประจุศูนย์ และจากงานวิจัย Zhang et al. (2014) พบว่าการนำเหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้น 100 g Fe/kg VSS เข้ามาในระบบผลิตไบโอแก๊สจากตะกอนน้ำเสียโรงงานสามารถเพิ่มการผลิตไบโอแก๊สได้สูงที่สุดถึง 0.2799 m³/kg VSS เมื่อเทียบกับทุกสภาวะ แต่ยังไม่มีการศึกษาร่วมกับกากมันสำปะหลัง ค่าความเป็นกรดเบสมีผลต่อการกักตร่อนฟิวโลหะ (Lin et al, 1999) มีผลดังต่อไปนี้

ที่ pH < 4 ปฏิกริยารีดักชันที่เกิดขึ้น คือ รีดักชันของไฮโดรเจนไอออน (Reduction of Hydrogen Ion) ผลของปฏิกิริยา คือ แก๊สไฮโดรเจน ไฮโดรเจนไอออนมีอยู่มาก เนื่องจากเป็นกรด ดังนั้นปฏิกิริยาการกักตร่อนจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

ที่ 8 > pH > 4 ปฏิกริยารีดักชันที่เกิดขึ้น คือ รีดักชันของออกซิเจน (Reduction of Oxygen) ความเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเร็วของการแพร่ของออกซิเจน ซึ่งเป็นไปอย่างช้าๆ

ที่ pH > 9 ปฏิกริยาการกักตร่อนจะช้าลงมาก เนื่องจากมีฟิล์มไฮดรอกไซด์ที่ผิวเหล็กการใช้สารยับยั้งในการควบคุมการกักตร่อนนั้น มักจะให้ผลดีก็ต่อเมื่อปริมาณคลอรีนไม่เกินขอบเขตที่จำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น

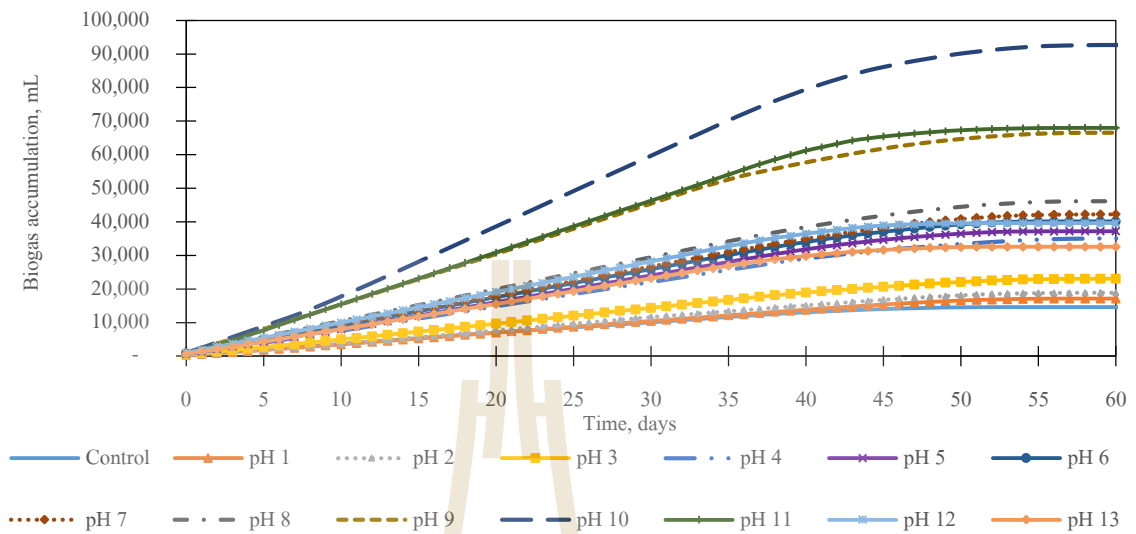
ผลจากการศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาในครั้งนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วย pH 1 - 13 อุณหภูมิ 100 °C เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้น 100 g/kg TVS



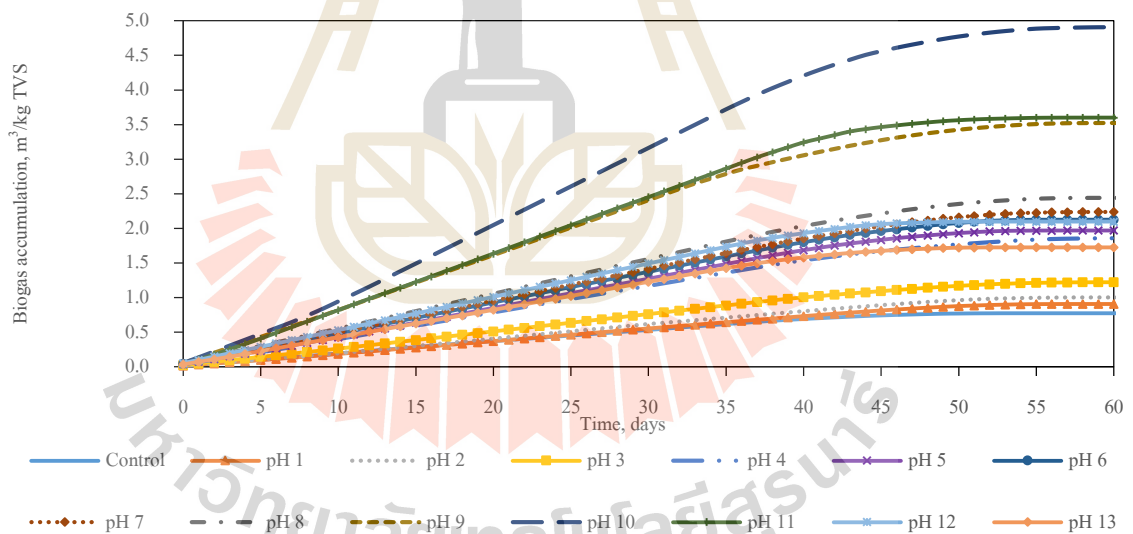
รูปที่ 4.7 กากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 1- pH 13, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อผลิตไบโอแก๊ส ปริมาณกากมันสำปะหลังสดที่ใช้คือ 100 กรัม ต่อ ปริมาณน้ำหมักกรด 850 ml ซึ่งปริมาณกากมันสำปะหลังสดต่อน้ำหมักกรดที่ใช้ มีความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 3% TS

จากรูปที่ 4.7 เป็นการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 1- pH 13, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อผลิตไบโอแก๊ส ปริมาณกากมันสำปะหลังสดที่ใช้คือ 100 กรัม ต่อ ปริมาณน้ำหมักกรด 850 ml ซึ่งปริมาณกากมันสำปะหลังสดต่อน้ำหมักกรดที่ใช้ มีความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 3% TS กากมันสำปะหลังเมื่อทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูงและมีสภาพความเป็นกรดเบสสูง จะทำให้กากมันสำปะหลังเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงจนกลายเป็นสีแดงไหม้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Agu et al. (1997) ที่ศึกษาการไฮโดรไลซิสเปลือกและกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ที่ความเข้มข้น 0.2 - 5 โมลาร์ ปรากฏว่า เมื่อทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรดแต่ละความเข้มข้นแล้ว กรดที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 1 โมลาร์ขึ้นไปทำให้สารละลายกากมันสำปะหลังเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงไหม้ และสอดคล้องกับการศึกษาของ อุดมเกียรติ พรพรรณประเทศ (2536) ที่ศึกษาการไฮโดรไลซิสแป้งเป็น 4 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด และแป้งด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.7 - 1 สำหรับแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว และความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.2 - 0.5 สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ที่ความเข้มข้นกรดร้อยละ 0.2 ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเปลี่ยนเป็นสีแดงจาง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นสีจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนการไฮโดรไลซิสในช่วง pH ที่เป็นกลาง คือ pH 6 - 8 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะพบว่าสีของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสจะมีสีดำ เช่นเดียวกับการศึกษาของ กิตติกานต์ สุขวณิชย์ (2554) ที่ศึกษาการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะพบว่าเมื่อไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดความเข้มข้นสูง กากมันสำปะหลังจะมีสีแดงเข้ม หลังจากผ่านการปรับ pH ให้เป็นกลาง ช่วง pH ที่เป็นกรดมาก กากมันสำปะหลังจะเปลี่ยนจากสีแดงไหม้ กลายเป็นสีดำไหม้ในที่สุด เช่นเดียวกับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังในช่วง pH 7 จะพบว่ากากมันสำปะหลังมีสีดำไหม้

4.2.1.5 ผลของการเกิดไบโอแก๊สเนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS



(ก) ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (mL) ในระบบในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน



(ข) อัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน

รูปที่ 4.8 (ก) ปริมาณไบโอแก๊สที่สะสม (ข) อัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสม ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดและเบส ที่ pH 1 – 13, อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 100 g/kg TVS ที่เวลา 60 วัน

จากกราฟรูปที่ 4.8 ผลจากการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 100 g/kg TVS พบว่าปริมาณไบโอแก๊สที่สะสมและอัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสมในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดและเบส ที่ pH 1 – 13 , อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ที่สภาวะควบคุม มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 0.7740 m³/kg TVS และจากการศึกษาพบว่าที่ pH 10 มีแนวโน้มอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้นเรื่อยๆ สามารถผลิตไบโอแก๊สมีค่ามากกว่าที่ pH อื่นๆ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดของแต่ละค่า pH จะพบว่าที่ pH 10 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดที่สุดคือ 4.906 m³/kg TVS และมีค่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าสภาวะควบคุม 503.81%, pH 1 441.33%, pH 2 391.02%, pH 3 302.11%, pH 4 164.68%, pH 5 149.44%, pH 6 131.16%, pH 7 119.45%, pH 8 101.13%, pH 9 39.45%, pH 11 36.45%, pH 12 134.13% และ pH 13 184.72% และจากการทดสอบทางสมมติฐานโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ที่นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะพบว่า pH 10 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดแตกต่างจากทุกๆสภาวะ แสดงดังตารางที่ 4.2-4.3 จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังคือ pH 10

เมื่อทำการเปรียบเทียบสภาวะที่มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดระหว่างที่มีการเติมเหล็กประจุศูนย์ และไม่มีการเติมเหล็กประจุศูนย์ จะพบว่า อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เมื่อเติมเหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 4.906 m³/kg TVS และอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดเมื่อไม่มีการเติมเหล็กประจุศูนย์ ที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ในหัวข้อ 4.1.1 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 2.115 m³/kg TVS จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า เมื่อมีการเติมเหล็กประจุศูนย์เข้าสู่ระบบการผลิตไบโอแก๊สจะทำให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สเพิ่มขึ้น และจากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สเพิ่มขึ้นถึง 131.85% และผลจากการทดลองดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2015), Zhen et al. (2015) และ Feng et al. (2014) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.16 และสรุปโดยย่อได้ดังต่อไปนี้

Zhang et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพน้ำเสียจากถังตกตะกอนขั้นที่ 2 ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 30 นาที ร่วมกับการไฮโดรไลซิสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 M เป็นเวลา 20 วัน ปริมาณตะกอนที่ใช้ 200 ml ใดๆก็ตามการปรับสภาพด้วยเบสอาจยับยั้งจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทน จึงได้มีการเติมเหล็กประจุศูนย์ (ZVI) เข้ามาในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็น ZVI powder

(0, 1, 2, 5 and 10 g/L, 0.2 mm diameter, 0.05 m²/g BET surface area, purity >98%) นอกเหนือจาก ZVI ที่ทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดแก๊สมีเทนเร็วขึ้นยังพบว่าเหล็กประจุศูนย์สามารถทำให้ผลผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 91.5% เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยน VFA ไปเป็นอะซิเตตได้มากขึ้น ทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดในระบบลดลง 27.6 - 18.8 ml/g VSS ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มขึ้น ZVI 0 -10 g/L ทำให้ผลการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 1.9 - 32.3 ml/g VSS ตามลำดับ

Zhen et al. (2015) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากกากตะกอนของเสีย โดยใช้เหล็กประจุศูนย์แบบแผ่น (ZVSI) มีการทดสอบโดยใช้ scale experiments offing uence of ZVSI (approx.2.0 mmin ความกว้างและความหนา 0.35mm) ขนาด 0, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 g/g VSS ตามลำดับ ในระหว่างการหมักมีการกวน 100 ± 1 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิ 35 ± 0.5 °C เป็นระยะเวลา 50 วัน ผลจากการศึกษาพบว่าเหล็กประจุศูนย์แบบแผ่น (ZVSI) ขนาด 1.0 g-ZVSI / g-VSS สามารถเพิ่มปริมาณแก๊สมีเทนในระบบได้สูงสุดถึง 174.9 ± 1. ml/g VSS คือเพิ่มขึ้นจากสถานะควบคุม 38.3% จากการทดลองยังพบว่าเหล็กประจุศูนย์แบบแผ่น (ZVSI) สำหรับการไฮโดไลซิสของตะกอน การอะซิโตเจเนซิส และอัตราการปล่อยแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 52.6 ± 0.4%, 44.5 ± 2.9% และ 40.8 ± 0.3% ตามลำดับเมื่อเทียบกับสถานะควบคุมที่ไม่มีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์แบบแผ่น (ZVSI)

Feng et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายกากตะกอนน้ำเสียจากถังตกตะกอนในสถานะไร้อากาศโดยใช้เหล็กประจุศูนย์เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ก่อนการหมักตะกอน มีการปรับสภาพตะกอนด้วย NaOH 4 mol/L เพื่อปรับให้มี pH เท่ากับ 12 และกวนตะกอนที่ 80 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ภายหลังจากปรับสภาพตะกอนด้วยค่าเวลาที่กำหนด ก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ตะกอนถูกปรับ pH ให้เป็นกลาง สำหรับเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็น ZVI powder (0, 1, 4, and 20 g/L, 0.2 mm diameter, 0.05 m²/g BET surface area, purity >98%) จากการศึกษามือเทียบกับสถานะควบคุมที่ไม่มีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์ พบว่ามีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น 21.9% และการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้น 37.3% ผลจากการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์เข้าไปในระบบ ทำให้อะซิเตตเพิ่มมากขึ้นและ propionate น้อยลง เป็นผลทำให้การผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นจากเดิม 43.5% และมีอัตราการลดกากตะกอนเพิ่มขึ้น 12.2%

4.2.1.6 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ

ทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Statistical hypothesis) การใช้โปรแกรมประยุกต์ทางสถิติ SPSS for Windows ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาความสัมพันธ์ของ pH แต่ละ pH กับปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลาในการหมัก 60 วัน และทำการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparison) เพื่อหาผู้ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ (Post hoc test) โดยใช้วิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) เขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

สมมติฐานทางสถิติ : $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$
 $H_1 :$ อย่างน้อยเฉลี่ย 2 ค่า หรือ 1 คู่ แตกต่างกัน

เมื่อกำหนดให้

H_0 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05
 H_1 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ที่นัยสำคัญ 0.05
 μ คือ ค่าเฉลี่ยไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละ Condition

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เมื่อเติมเหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS เข้าสู่การหมัก โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA)

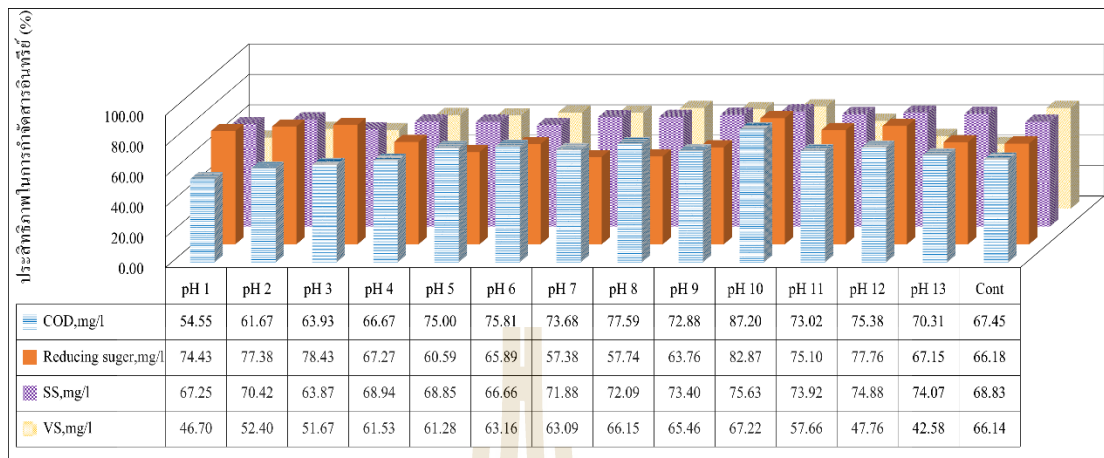
	Sum of Squares	df.	Mean Square	F	Significant
Between Groups	89215645.539	13	6862741.965	846.049	0.000
Within Groups	3406836.903	420	8111.516		
Total	92622482.442	433			

จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติ พบว่า มีค่า Significant = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 และยอมรับ H_1 คือ อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ pH ต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน จึงมีการทดสอบ Post hoc test โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) เพื่อหาว่าคู่ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊ส สูงที่สุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เมื่อเติมเหล็กประจุ ศูนย์ 100 g/kg TVS เข้าสู่การหมัก โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

(I) pH	(J) pH	Significant	(I) pH	(J) pH	Significant	(I) pH	(J) pH	Significant
Cont.	pH 1	1.000	pH 10	Cont.	0.000	pH 13	Cont.	0.000
	pH 2	0.996		pH 1	0.000		pH 1	0.000
	pH 3	0.000		pH 2	0.000		pH 2	0.000
	pH 4	0.000		pH 3	0.000		pH 3	0.000
	pH 5	0.000		pH 4	0.000		pH 4	0.941
	pH 6	0.000		pH 5	0.000		pH 5	0.996
	pH 7	0.000		pH 6	0.000		pH 6	0.011
	pH 8	0.000		pH 7	0.000		pH 7	0.000
	pH 9	0.000		pH 8	0.000		pH 8	0.000
	pH 10	0.000		pH 9	0.000		pH 9	0.000
	pH 11	0.000		pH 11	0.000		pH 10	0.000
	pH 12	0.000		pH 12	0.000		pH 11	0.000
	pH 13	0.000		pH 13	0.000		pH 12	0.000
* Cont. คือ Control (ชุดควบคุม) (อ้างอิงจากผลการศึกษาในภาคผนวก)								

จากตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบ Post hoc test ของแต่ละกลุ่มตัวอย่างเทียบกันด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) จะพบว่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ pH 10 เป็นเพียงสถานะเดียว ที่มีค่า Significant = 0.000 หรือ น้อยกว่า 0.05 เมื่อเทียบกับทุกการทดลอง หมายความว่า การย่อยสลายกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C เวลา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุด แตกต่างจากทุกสถานะ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS คือ การย่อยสลายกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C เวลา 30 นาที

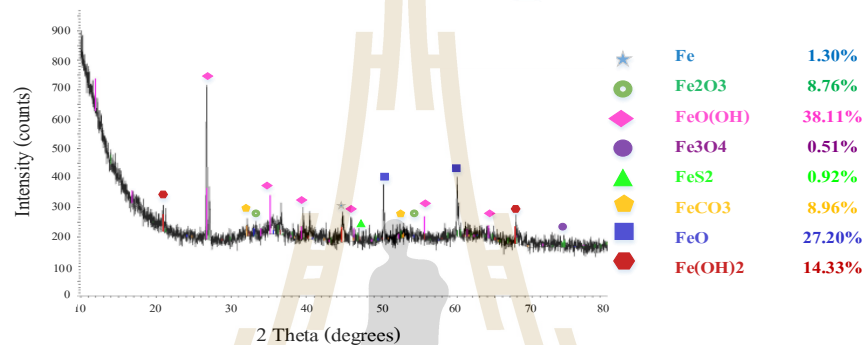


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%) ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS

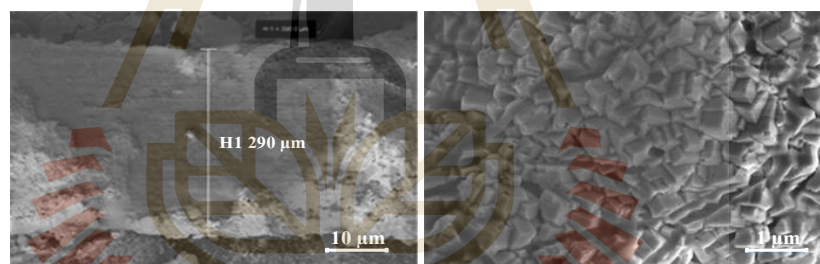
จากรูปที่ 4.9 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD อยู่ในช่วง 54.55 - 87.20% น้ำตาลรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 57.38 - 82.87% ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) อยู่ในช่วง 63.87 - 75.63% และของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) อยู่ในช่วง 42.58 - 67.22% โดยที่ ในสภาวะการไฮโดรไลซิสจากมันสำปะหลังที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุด

4.2.1.7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กประจุศูนย์ จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส เมื่อเหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากหมักที่เวลา 60 วัน

ออกไซด์ของเหล็กประจุศูนย์ภายหลังจากให้อิเล็กตรอนในการเพิ่มการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเบสที่สภาวะต่างๆ มีลักษณะของออกไซด์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไป อธิบายได้ดังรูปที่ 4.10 – 4.22



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.10 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 1 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	1.30%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	8.76%
FeOOH (Fe ³⁺)	38.11%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.51%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.92%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	8.96%
FeO (Fe ²⁺)	27.20%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	14.33%

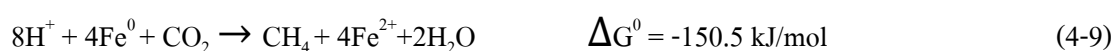
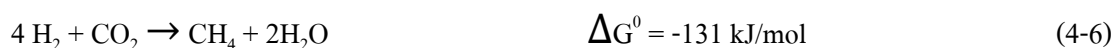
จากรูปที่ 4.10 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊ส จากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 1 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 47.79% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 50.49% ในสภาวะดังกล่าวมีการเติมกรดเข้มข้น เพื่อใช้ในการปรับ pH คือ H_2SO_4 จึงพบเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{2+} เป็นส่วนมาก เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์มีศักย์การนำไฟฟ้าต่ำกว่า H_2O , H^+/H_2 จึงสามารถให้อิเล็กตรอนได้ดี เหล็กจึงเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย (Enning et al., 2012) ดังสมการที่ (4-1) - (4-3)

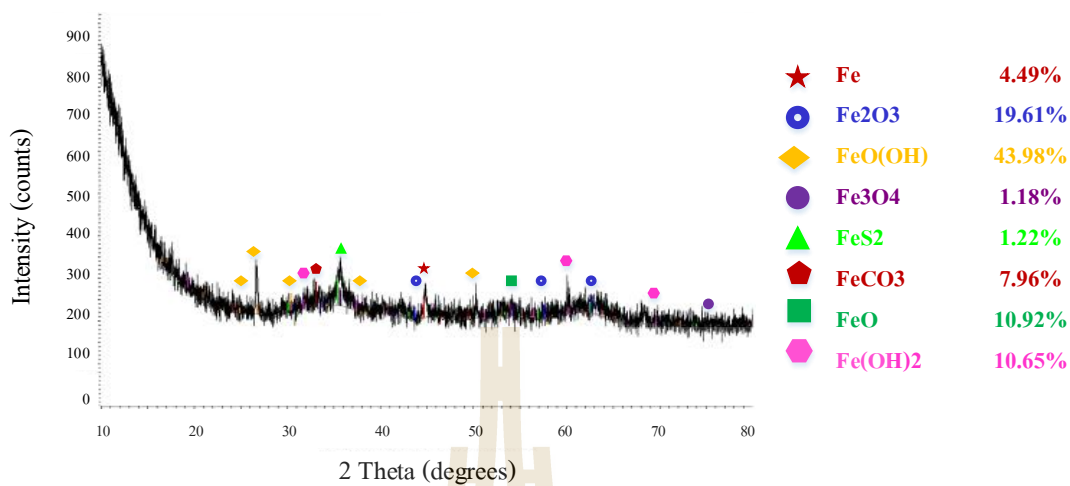


เนื่องจากการย่อยสลายกากมันสำปะหลังที่ pH 1 มีการใช้กรดซัลฟูริกในการปรับ pH เป็นจำนวนมาก ทำให้เหล็กประจุศูนย์นอกจากจะถูกใช้ไปในรีดโปรตรอนจากกากแตกตัวของน้ำแล้ว ยังถูกใช้ไปในการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกอีกด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ของระบบ ΔG^0 น้อยกว่าการกัดกร่อนจากการรับโปรตรอน ดังสมการที่ (4-4)-(4-5)

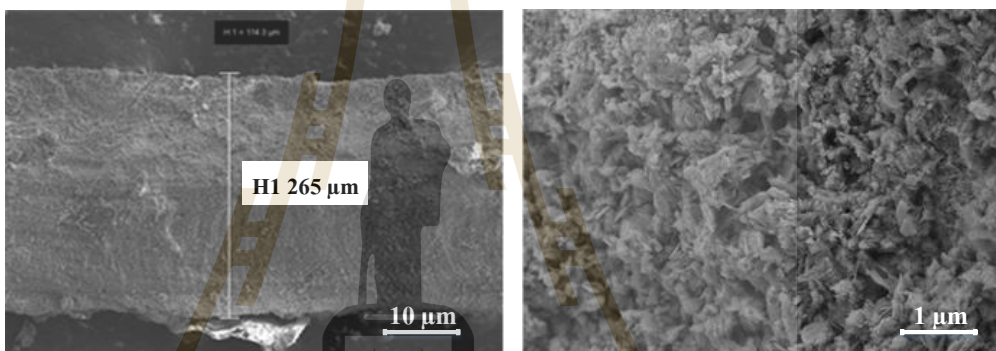


ส่งผลให้มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำ เพราะอิออนของเหล็ก ถูกนำไปใช้ในการกัดกร่อน แทนที่จะถูกนำไปผลิตไบโอแก๊ส (Hao et al, 2017) ดังสมการที่ (4-6) – (4-7)





(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.11 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 2 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	4.49%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	19.61%
FeOOH (Fe ³⁺)	43.98%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	1.18%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.22%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	7.96%
FeO (Fe ²⁺)	10.92%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	10.65%

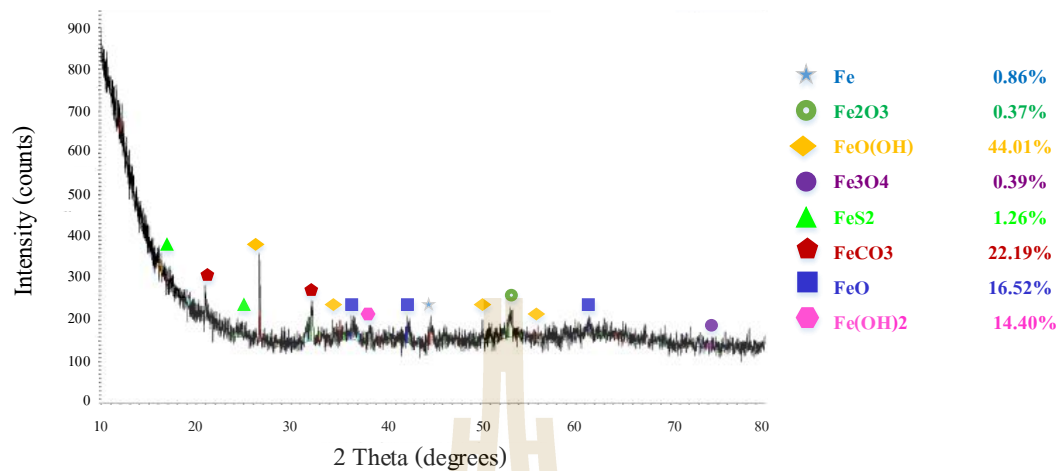
จากรูปที่ 4.11 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊ส จากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไรโครไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 2 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 29.57% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 64.81% ในสภาวะดังกล่าวมีการเติมกรดเข้มข้น เพื่อใช้ในการปรับ pH คือ H_2SO_4 และ $NaOH$ จึงพบเหล็กในรูปของ Ferrous oxide (FeO), Hematite (Fe_2O_3) และ Limonite ($Fe(OH)_2$) ปัจจัยสำคัญในการเกิดสนิมจะต้องมีสารตั้งต้นอยู่สองตัว คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) สารทั้งสองชนิดนี้ ปกติจะมีอยู่ในอากาศ โดยทั่วไป สามารถทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็น H_2CO_3 ซึ่งเป็น Electrolyte ที่มีฤทธิ์ เป็นกรดอ่อนๆ (Hua et al, 2015) ส่งผลให้มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำ เพราะอิออนของเหล็ก ถูกนำไปใช้ในการกัดกร่อน แทนที่จะถูกนำไปผลิตไบโอแก๊ส แสดงดังสมการที่ (4-11) – (4-16)



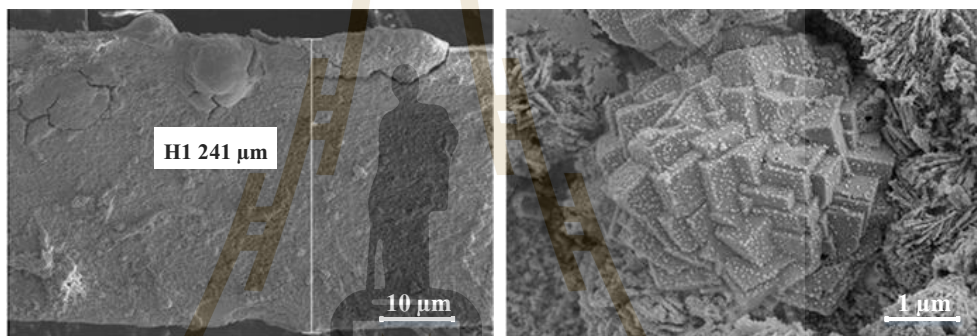
อีกทั้งเมื่อเหล็กประจุศูนย์ทำปฏิกิริยากับ ไบคาร์บอเนตและน้ำเพื่อเกิดเป็นแก๊สมีเทน ก็ยังทำให้เกิดตะกอนของ $FeCO_3$ ซึ่งพบได้บริเวณชั้นเหล็กเมื่อนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD (Hao et al, 2017) ดังสมการที่ (4-17)



ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กประจุศูนย์ในสภาวะดังกล่าว จึงมีลักษณะเป็นผลึกจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ กระจายอยู่ในบริเวณต่างๆของชิ้นงาน การแลกเปลี่ยนอิออนเพื่อผลิตไบโอแก๊สจึงต่ำ



(ก)



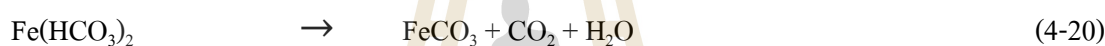
(ข)

(ค)

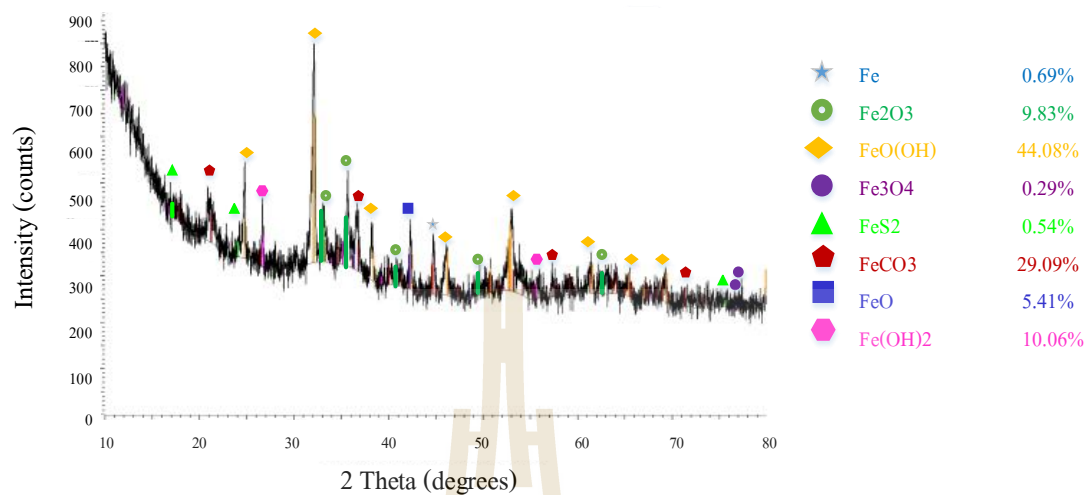
รูปที่ 4.12 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 3 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	0.86%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	0.57%
FeOOH (Fe ³⁺)	44.01%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.59%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.26%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	22.19%
FeO (Fe ²⁺)	16.52%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	14.40%

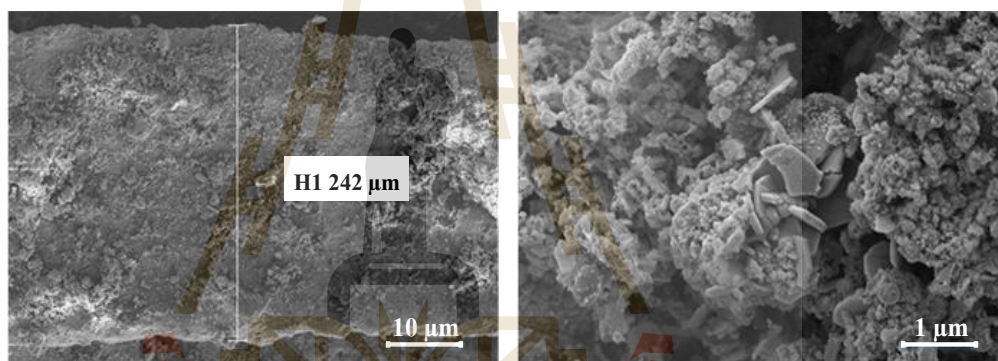
จากรูปที่ 4.12 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 3 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 45.84% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 53.11% ซึ่งประกอบไปด้วย Siderite (FeCO_3) 22.19%, FeO 16.52% และ Fe(OH)_2 14.40% ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดสนิมเนื่องจากอ็อกซิเจนของเหล็กมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดังสมการที่ (4-18) – (4-20)



ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในสภาวะดังกล่าว จึงมีรูปร่างหลากหลาย เนื่องจากมีทั้งส่วนของ FeCO_3 , FeO และ Fe(OH)_2 และเนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ถูกใช้ไปในการเกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของ Fe^{2+} ส่งผลให้มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำ เพราะอ็อกซิเจนของเหล็ก ถูกนำไปใช้ในการกัดกร่อน แทนที่จะถูกนำไปผลิตไบโอแก๊ส



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.13 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วย pH 4 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	0.69%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	9.83%
FeOOH (Fe ³⁺)	44.08%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.29%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.54%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	29.16%
FeO (Fe ²⁺)	5.41%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	10.06%

จากรูปที่ 4.13 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 4 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 54.45% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 44.63% แสดงว่าเหล็กประจุศูนย์ถูกนำไปใช้ในการผลิตไบโอแก๊สมากกว่าที่ pH 1-3 แต่ไม่มากพอ เนื่องจากยังมีเหล็กออกไซด์ในรูปของ Fe²⁺ อยู่ในปริมาณที่สูง ในสภาวะดังกล่าวเหล็กส่วนมากอยู่ในรูปของ FeOOH (Zise et al, 2007) แสดงการเกิดดังสมการที่ (4-24) – (4-25)

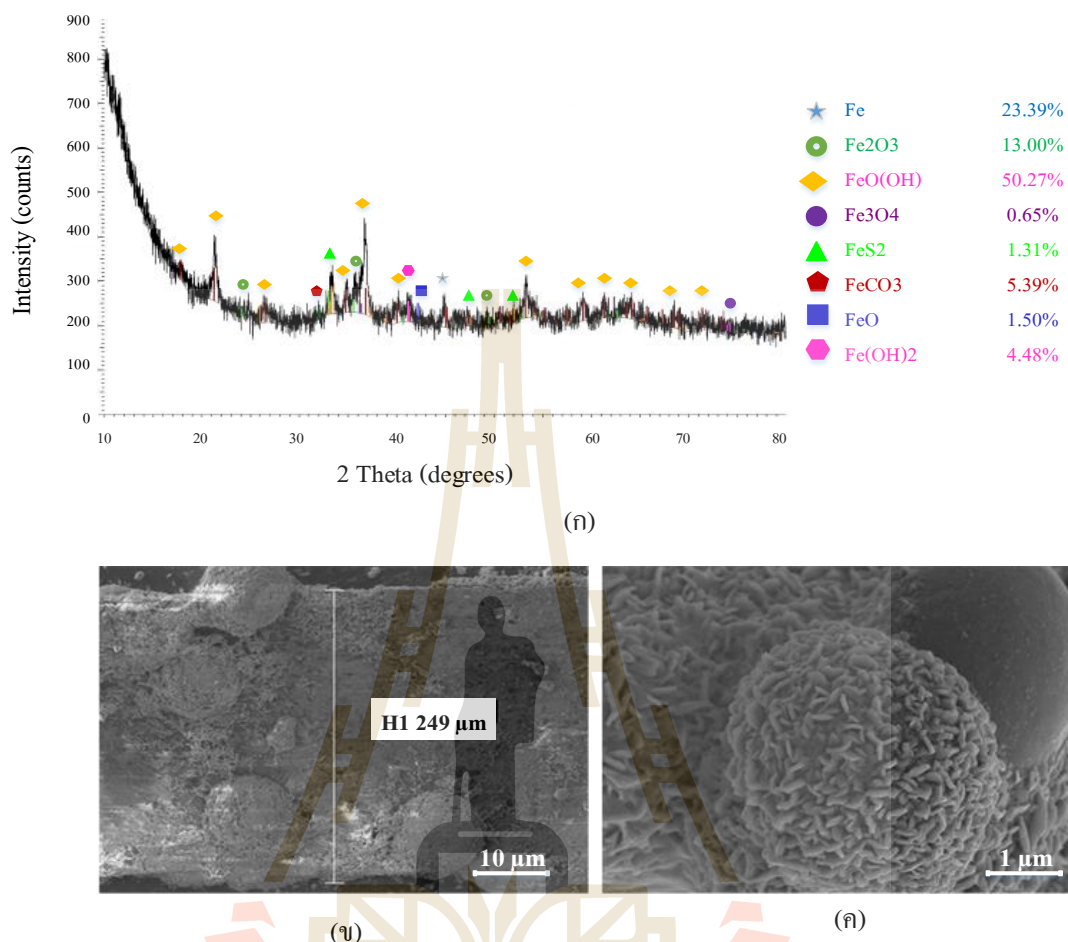


ในทำนองเดียวกันแบคทีเรียที่เป็นเนื้อเดียวกันอาจทำให้เกิด CO₂ / H₂ ได้เป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวสำหรับการก่อตัวของสารตั้งต้น methanogenicacetate ดังสมการ (4-26) (Fang et al, 2014) ซึ่งจะถูกลดลงเป็นมีเทน ดังสมการที่ (4-27) ดังนั้นผลผลิตของมีเทนในระบบจึงมีปริมาณมากขึ้น



นอกจากนี้ Fe⁰ ยังสามารถจัดพิษและสารที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียผลิตไบโอแก๊ส เช่น H₂S ได้ (Li et al, 2007) ซึ่งจะไปสู่เสถียรภาพในการผลิตแก๊สมีเทนมากขึ้น แสดงดังสมการ (4-32)





รูปที่ 4.14 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 5 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	23.39%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	13.00%
FeOOH (Fe ³⁺)	50.27%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.65%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.31%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	5.39%
FeO (Fe ²⁺)	1.50%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	4.48%

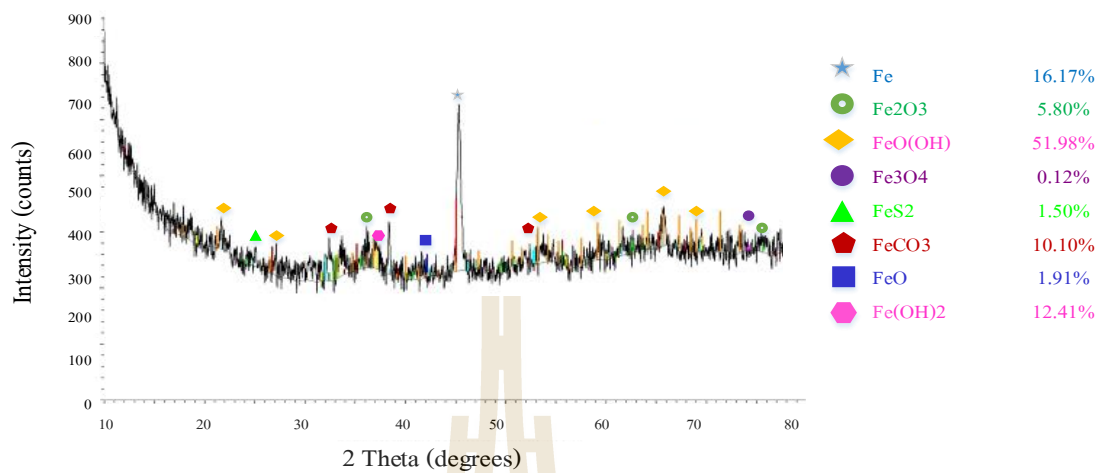
จากรูปที่ 4.14 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS

ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 5 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 64.58% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 11.37% และ Fe⁰ 23.39% ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในสภาวะดังกล่าวยังเกิดเป็นแกรนขยานใหญ่กระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่น และเหล็กประจุศูนย์ขนาด 100 g/kg TVS ยังมีปริมาณมากเกินความต้องการในการใช้เพื่อผลิตเป็นไบโอแก๊สอีกถึง 23.39%

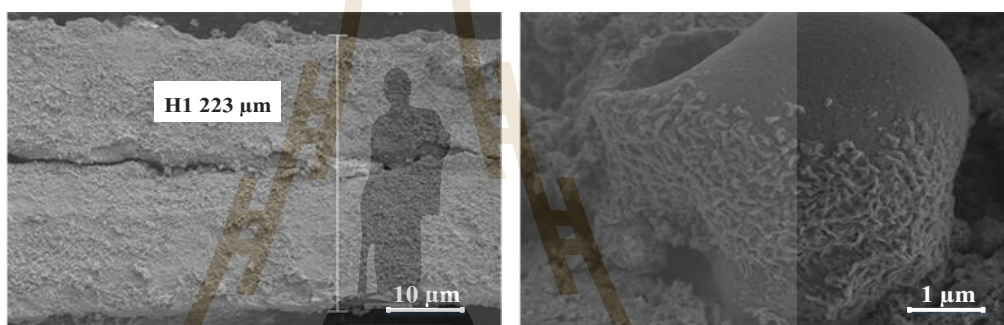
เนื่องจากการมีส่วนร่วมของ ORProduction ในการผลิต CH₄ ได้รับการยกเว้นตามที่อธิบายไว้ข้างต้นแล้ว การเกิดไบโอแก๊สที่เป็นไปได้ควรจะประกอบด้วย: 1) hydrogen evolution การกักกร่อนเนื่องจากไฮโดรเจนที่เกิดจากการกักกร่อนของเหล็กอาจส่งเสริมการเกิดเมธานอลเมตริกและกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อ (homoacetogene) 2) เหล็กประจุศูนย์เป็นผู้ให้อิเล็กตรอนที่ดี จึงทำให้อัตราการเกิดไบโอแก๊สเพิ่มขึ้น methanogenesis ด้วยการใช้ไฮโดรเจน (Daniels et al, 1987; Karri et al, 2005) ดังสมการที่ (4-32)



เนื่องจากสภาวะดังกล่าว ไม่มีการใช้กรดซัลฟูริกในระบบ จึงทำให้อัตราการเกิดไบโอแก๊สใน pH 5 สูงกว่าที่ pH 1 - 4 เพราะอ็อกซิเดชันของเหล็กประจุศูนย์ ไม่ได้ถูกนำไปกำจัด H₂S ที่เกิดจากการผุกร่อนของเหล็กในสภาวะไร้อากาศ เมื่อมี H₂SO₄



(ก)



(ข)

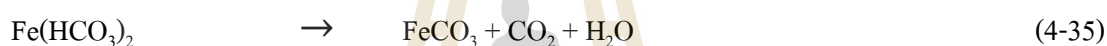
(ค)

รูปที่ 4.15 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วย pH 6 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ซึ่งงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

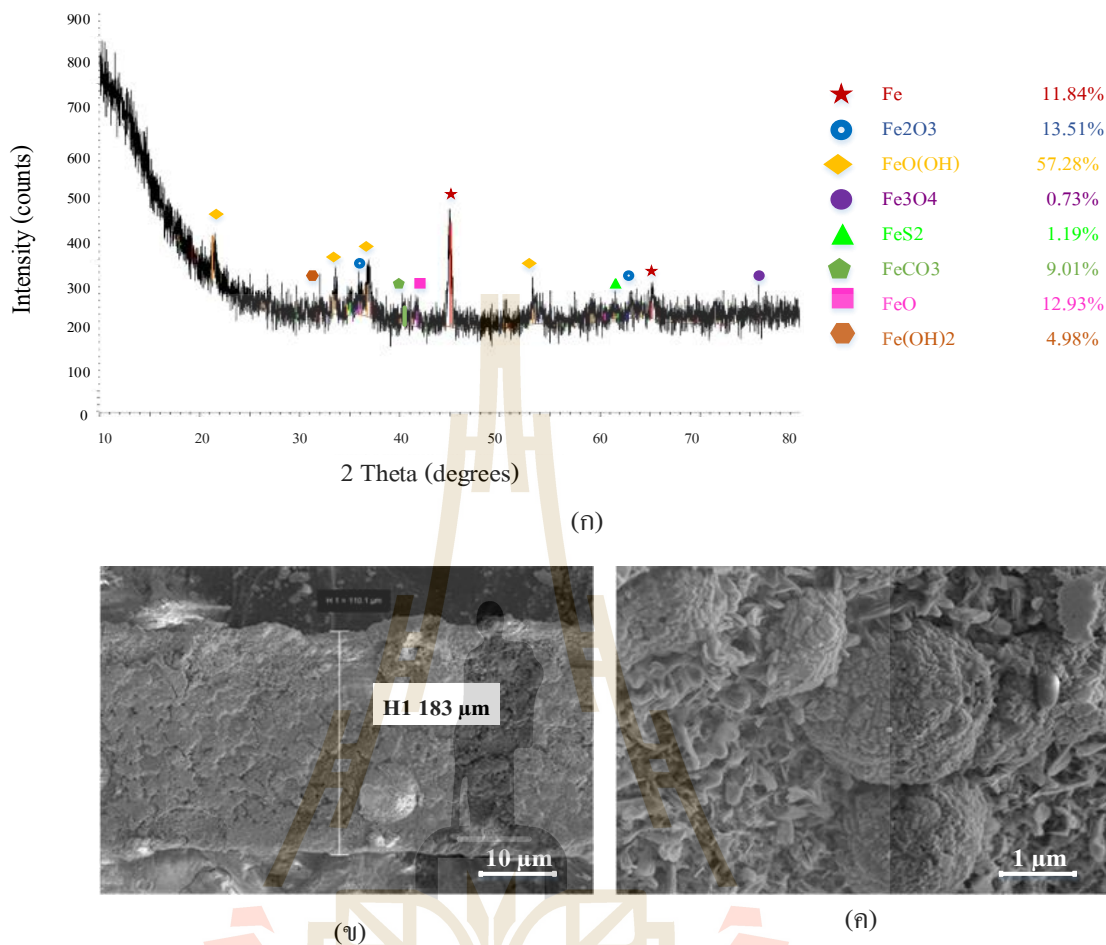
Fe	16.17%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	5.80%
FeOOH (Fe ³⁺)	51.98%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.12%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.50%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	10.10%
FeO (Fe ²⁺)	1.91%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	12.41%

จากรูปที่ 4.15 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg

TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 6 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 59.42% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 24.42% และ Fe^0 16.17% ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในสภาวะดังกล่าวยังเกิดเป็นแกรนขนาดใหญ่งกระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่น เช่นเดียวกับที่ pH 5 และเหล็กประจุศูนย์ขนาด 100 g/kg TVS ยังมีปริมาณมากเกินความต้องการในการใช้เพื่อผลิตเป็นไบโอแก๊สอีกถึง 16.17% นอกจากนี้ในสภาวะดังกล่าว มีการใช้ $NaHCO_3$ ในการปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ซึ่งทำให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของ $FeCO_3$ ดังสมการที่ (4-33) – (4-35)



เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มเข้าสู่ระบบมีปริมาณเกินความต้องการในการออกซิไดซ์ สัณฐานวิทยาของการกักร่อนจึงมีลักษณะคล้ายกับ pH 5 คือมีแกรนขนาดใหญ่งกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ความสามารถในการผลิตไบโอแก๊สเมื่อทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงพบว่า อัตราการเกิดไบโอแก๊สเมื่อมีการย่อยสลายกากมันสำปะหลังสำปะหลังที่ pH 5 และ pH 6 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

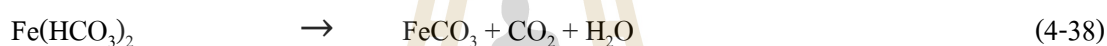


รูปที่ 4.16 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 7 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

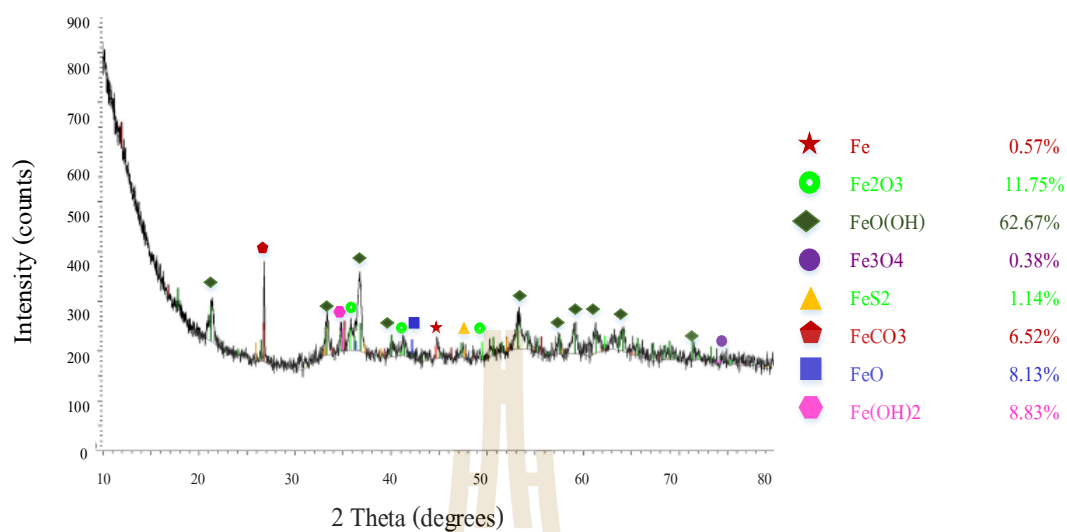
Fe	11.85%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	13.51%
FeOOH (Fe ³⁺)	57.28%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.73%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.19%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	9.01%
FeO (Fe ²⁺)	12.93%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	4.98%

จากรูปที่ 4.16 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS

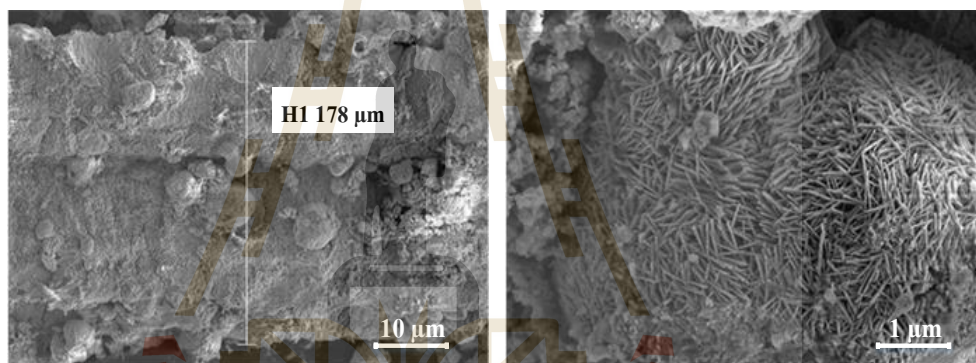
ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 7 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 61.98% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 26.92% และ Fe^0 11.85% ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในสภาวะดังกล่าวยังเกิดเป็นแกรนขนาดใหญ่อะไรอยู่ทั่วทั้งแผ่น เช่นเดียวกับที่ pH 5-6 และเหล็กประจุศูนย์ขนาด 100 g/kg TVS ยังมีปริมาณมากเกินความต้องการในการใช้เพื่อผลิตเป็นไบโอแก๊สอีกถึง 16.17% นอกจากนี้ในสภาวะดังกล่าว มีการใช้ NaHCO_3 ในการปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ซึ่งทำให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของ FeCO_3 ดังสมการที่ (4-36) – (4-38)



เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มเข้าสู่ระบบมีปริมาณเกินความต้องการในการออกซิไดซ์ สัณฐานวิทยาของการกัดกร่อนจึงมีลักษณะคล้ายกับ pH 5 - 6 คือมีแกรนขนาดใหญ่อะไรอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ความสามารถในการผลิตไบโอแก๊สเมื่อทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงพบว่า อัตราการเกิดไบโอแก๊สเมื่อมีการย่อยสลายกากมันสำปะหลังสำปะหลังที่ pH 5 - 7 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



(ก)



(ข)

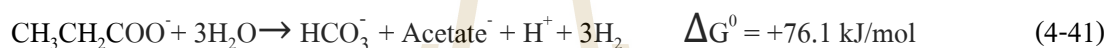
(ค)

รูปที่ 4.17 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 8 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

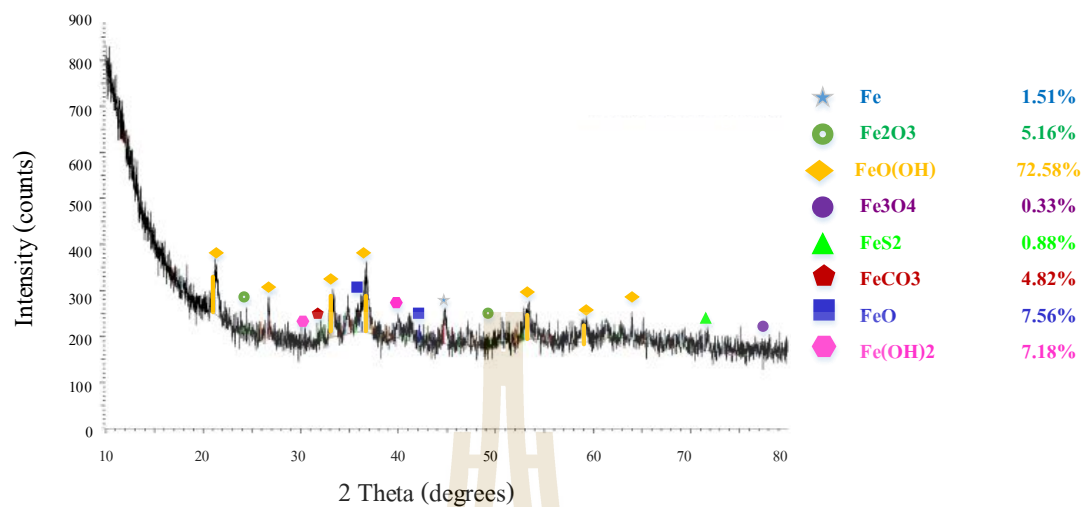
Fe	0.57%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	11.75%
FeOOH (Fe ³⁺)	62.67%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.38%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.14%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	6.52%
FeO (Fe ²⁺)	8.13%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	8.83%

จากรูปที่ 4.17 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg

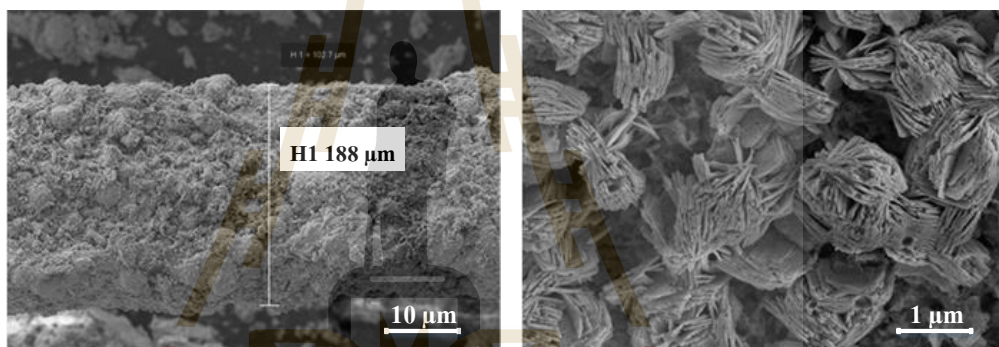
TVS ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 8 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 75.56% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 23.48% เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกใช้ไปในการผลิตไบโอแก๊ส จึงทำให้ออกไซด์ของเหล็กอยู่ในรูปของ Fe^{3+} เป็นส่วนมาก นอกจากเหล็กประจุศูนย์จะทำปฏิกิริยากับ CO_2 และ H_2 เพื่อเกิดเป็นไบโอแก๊ส ดังสมการที่ (4-39) แล้ว เหล็กประจุศูนย์ยังสามารถทำปฏิกิริยากับ VFA ในระบบได้ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในสถานะเบสจึงเพิ่มขึ้น (Zhang et al, 2014) ดังสมการที่ (4-40) – (4-42)



ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กออกไซด์บนชิ้นงาน จึงมีลักษณะคล้ายแผ่นโลหะชิ้นเล็กๆ ลักษณะเป็นแท่งเรียวยาวเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบ แต่อาจมีลักษณะสั้นยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการกักค้อน โดยที่การกักค้อนลักษณะนี้ เป็นการกักค้อนขั้นแรกของเหล็ก (Zise et al., 2007)



(ก)



(ข)

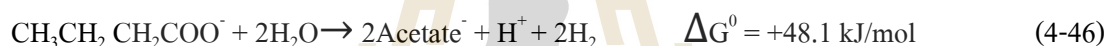
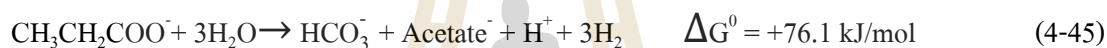
(ค)

รูปที่ 4.18 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วย pH 9 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

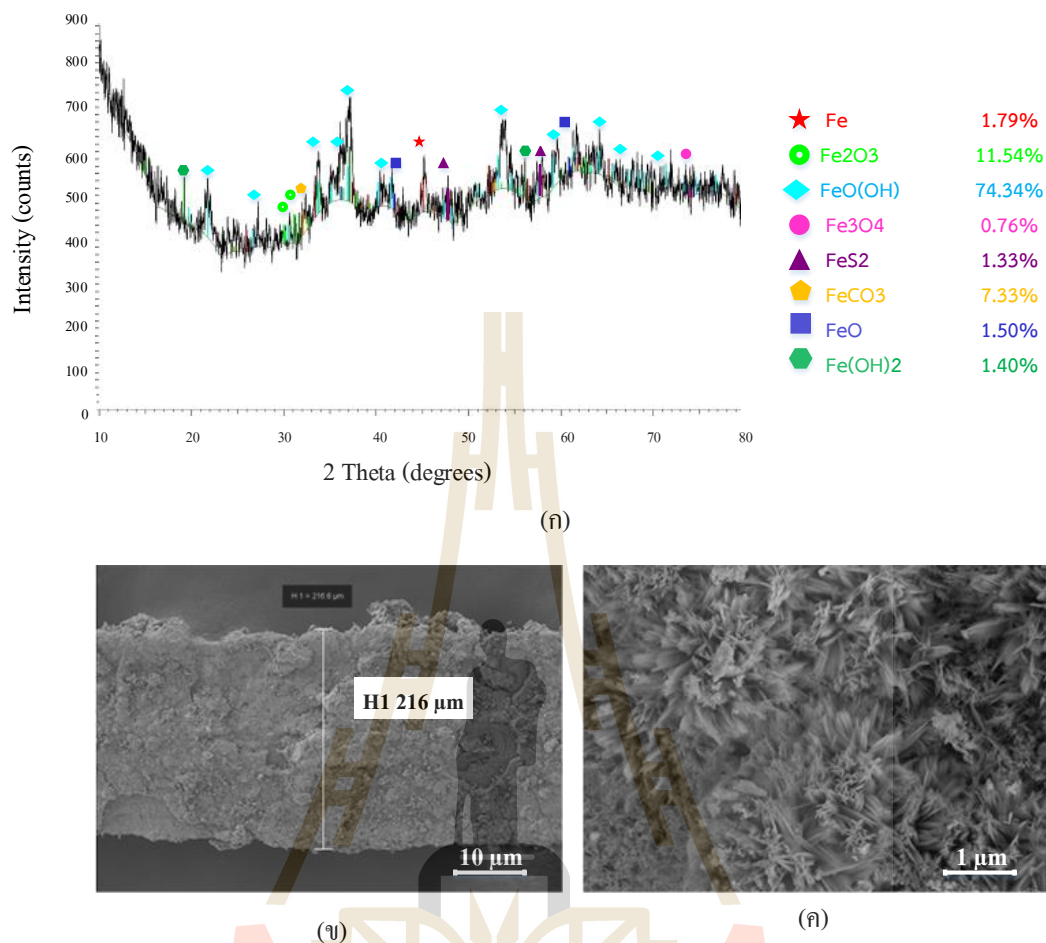
Fe	1.51%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	5.16%
FeOOH (Fe ³⁺)	72.58%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.33%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.88%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	4.82%
FeO (Fe ²⁺)	7.56%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	7.18%

จากรูปที่ 4.18 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg

TVS ภายหลังกการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 9 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 78.62% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 19.56% ผลจากการศึกษามีลักษณะคล้ายกับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 8 เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ส่วนมากถูกใช้ไปในการผลิตไบโอแก๊ส จึงทำให้ออกไซด์ของเหล็กอยู่ในรูปของ Fe^{3+} เป็นส่วนมาก นอกจากเหล็กประจุศูนย์จะทำปฏิกิริยากับ CO_2 และ H_2 เพื่อเกิดเป็นไบโอแก๊ส ดังสมการที่ (4-43) แล้ว เหล็กประจุศูนย์ยังสามารถทำปฏิกิริยากับ VFA ในระบบได้ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในสภาวะเบสจึงเพิ่มขึ้น (Zhang et al., 2014) ดังสมการที่ (4-44) - (4-46)



ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กออกไซด์บนชิ้นงาน จึงมีลักษณะคล้ายแผ่นโลหะขึ้นเล็ก ๆ ลักษณะเป็นแท่งเรียวยาวเล็กเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบ แต่อาจมีลักษณะสั้นยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการกักร่อน โดยที่การกักร่อนลักษณะนี้ เป็นการกักร่อนขั้นแรกของเหล็ก เช่นเดียวกับที่ pH 8 (Zise et al, 2007)



รูปที่ 4.19 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	1.79%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	11.54%
FeOOH (Fe ³⁺)	74.34%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.76%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.33%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	7.33%
FeO (Fe ²⁺)	1.50%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	1.40%

จากรูปที่ 4.19 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสจากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการ

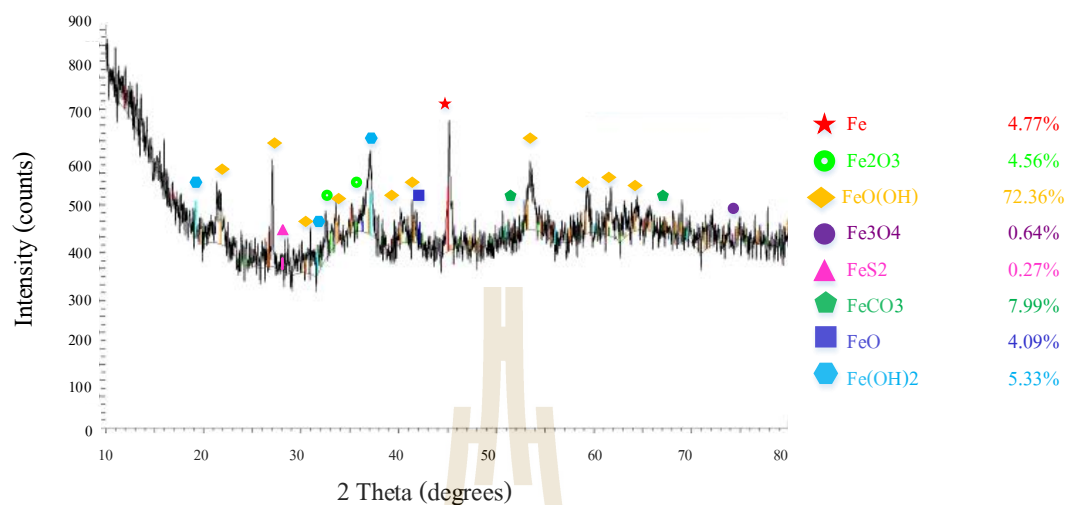
ทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 87.21% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 10.23% ซึ่งเป็นสถานะเดียวที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์ในรูปของ Fe^{3+} สูงที่สุด อีกทั้งยังมีปริมาณไบโอแก๊สที่ผลิตได้สูงที่สุด แตกต่างจากการไฮโดรไลซิสที่ pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังสมการ (4-47) – (4-55)



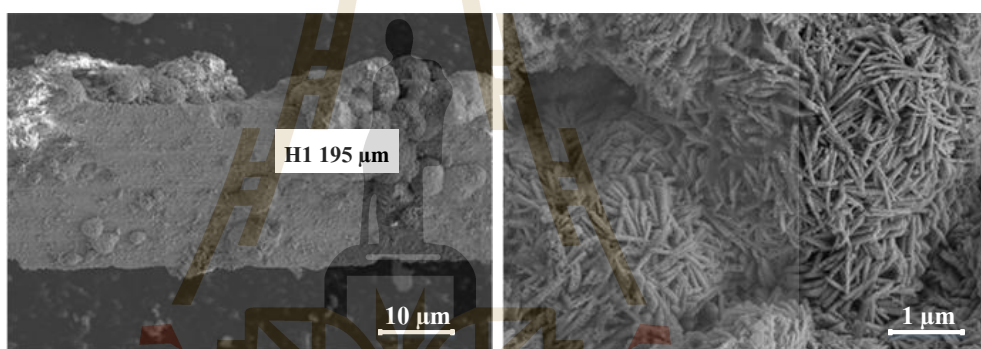
นอกเหนือจากการเกิดไบโอแก๊สในสภาวะไร้อากาศที่ไม่มีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์แล้ว อีออนของเหล็กประจุศูนย์ถูกใช้ไปในการผลิตไบโอแก๊สมากกว่าถูกใช้ไปในการกักถ่อน ดังสมการที่ (4-56) – (4-58)



ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานในสภาวะนี้ จึงมีลักษณะเป็นหินย้อยคล้ายกับพื้นผิวของสิ่งประดิษฐ์เหล็ก มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กกระจายหลวมๆ คล้ายกลีบดอกไม้เล็กๆ แต่อาจมีลักษณะสั้นยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการกัก (Zise et al, 2007)



(ก)



(ข)

(ค)

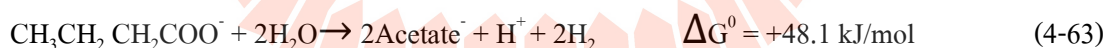
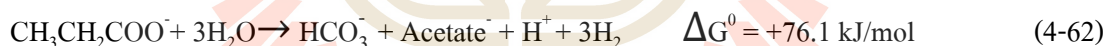
รูปที่ 4.20 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 11 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	4.77%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	4.56%
FeOOH (Fe ³⁺)	72.36%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.64%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.27%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	7.99%
FeO (Fe ²⁺)	4.09%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	5.33%

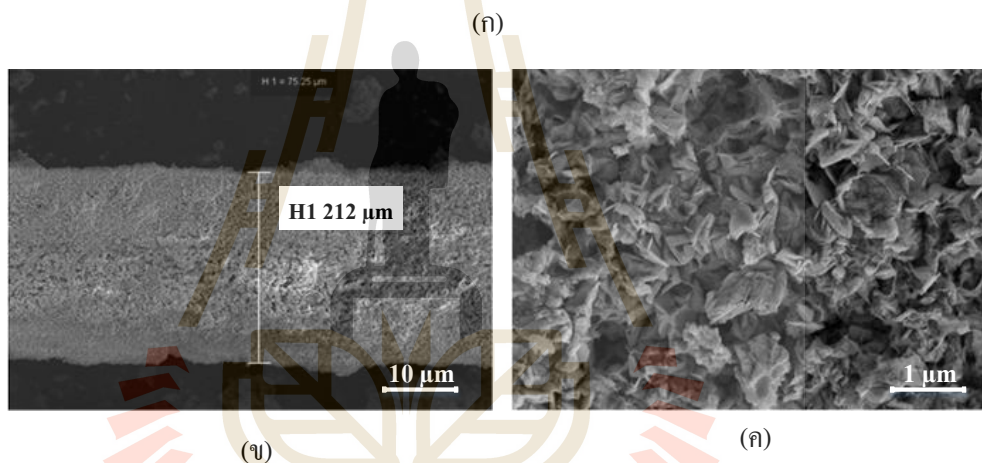
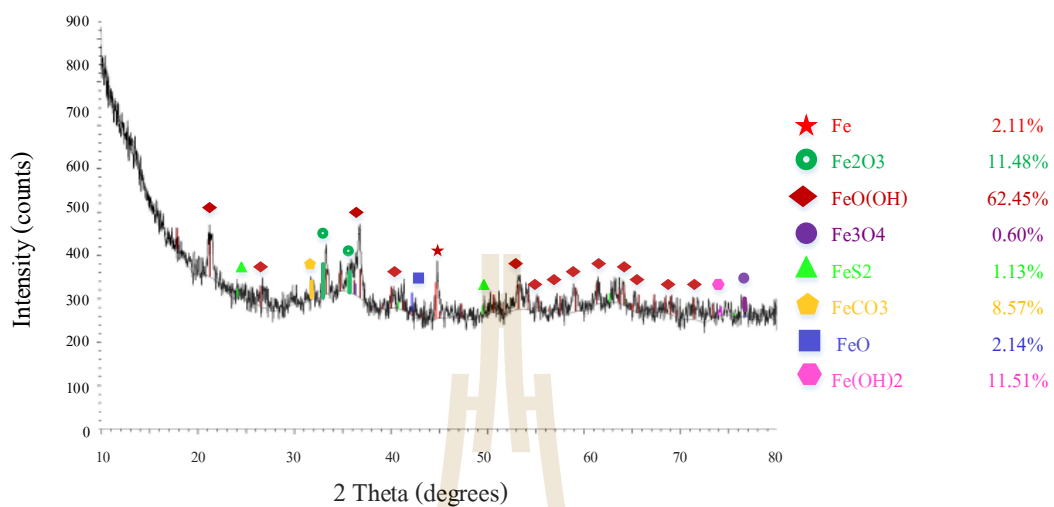
จากรูปที่ 4.20 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 11 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 77.19% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 17.41% ผลจากการศึกษามีลักษณะคล้ายกับ pH 9 ทั้งในเรื่องของปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้น และปริมาณของเหล็กออกไซด์ แตกต่างกันตรงที่ pH 11 มีการใช้กรดซัลฟูริกในการปรับ pH ให้เป็นกลางมากกว่า pH 9-10 ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นจึงน้อยกว่า เพราะอ็อกซิเจนที่ควรถูกใช้สำหรับการเกิดไบโอแก๊ส ถูกใช้ในการกำจัด H₂S ที่เกิดขึ้นในระบบ แสดงดังสมการที่ (4-59)



โดยที่เหล็กประจุศูนย์ที่เหลือจากการกำจัด H₂S ในระบบ จะทำปฏิกิริยากับ VFA ในระบบเพื่อเปลี่ยนจาก VFA ให้กลายเป็นไบโอแก๊ส ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในสภาวะเบสจึงเพิ่มขึ้น (Zhang et al, 2014) ดังสมการที่ (4-60) – (4-63)



ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กออกไซด์บนชิ้นงาน จึงมีลักษณะคล้ายแผ่นโลหะชิ้นเล็กๆ ลักษณะเป็นแท่งเรียวยาวเล็กเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบ แต่อาจมีลักษณะสั้นยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการกักกร่อน โดยที่การกักกร่อนลักษณะนี้ เป็นการกักกร่อนขั้นแรกของเหล็ก เช่นเดียวกับที่ pH 8 - 9 (Zise et al, 2007)



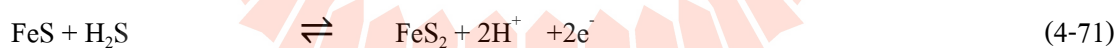
รูปที่ 4.21 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วย pH 12 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ขึ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	2.11%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	11.48%
FeOOH (Fe ³⁺)	62.45%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.60%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.13%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	8.57%
FeO (Fe ²⁺)	2.14%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	11.51%

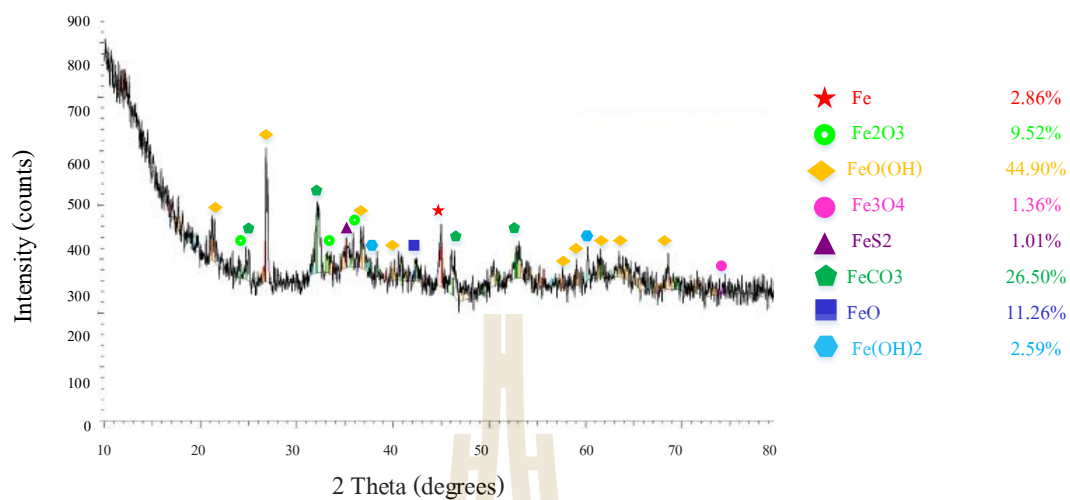
จากรูปที่ 4.21 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 12 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 75.03% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 22.22% ผลจากการศึกษามีลักษณะคล้ายกับ pH 9 และ pH 11 เหล็กประจุศูนย์ที่อยู่ในระบบถูกใช้ในการกำจัด H₂S แสดงดังสมการที่ (4-64)



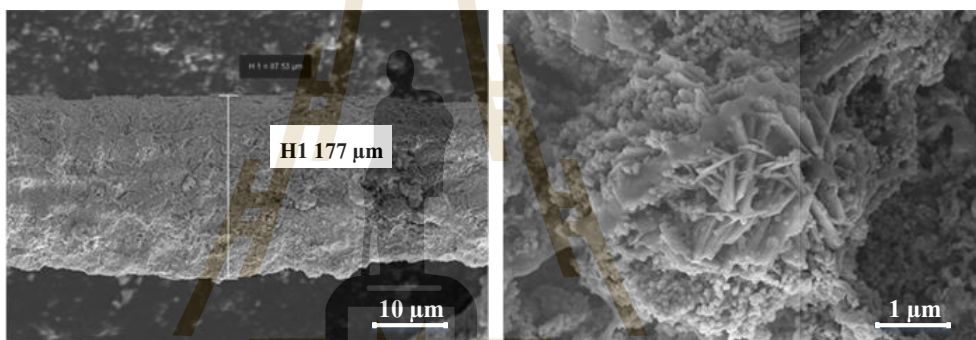
ในระบบมีการเติมกรด เพื่อใช้ในการปรับ pH คือ H₂SO₄ สรุปได้ว่าการกักกร่อนแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่เกิดจากการใช้เหล็กตามรูปแบบของ lithotrophic (Zhang et al, 2015) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4-65) – (4-71)



ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับที่ pH 10



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.22 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วย pH 13 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วยเหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

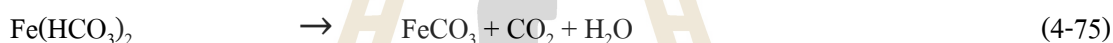
Fe	2.86%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	9.52%
FeOOH (Fe ³⁺)	44.90%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	1.36%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.01%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	26.50%
FeO (Fe ²⁺)	11.26%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	2.59%

จากรูปที่ 4.22 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS

ภายหลังการไฮโดรไลซิสจากมันสำปะหลังด้วย pH 13 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 55.43% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 40.35% ผลจากการศึกษามีลักษณะคล้ายกับ pH 9 และ pH 11 เหล็กประจุศูนย์ที่อยู่ในระบบถูกใช้ในการกำจัด H₂S แสดงดังสมการที่ (4-72)



ออกไซด์ของเหล็กอยู่ในรูปของ FeCO₃ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดสนิมเนื่องจากอิออนของเหล็กมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอเนตได้ดังสมการที่ (4-73)–(4-75)



เมื่อสังเกตลักษณะพื้นฐานทางวิทยาของชิ้นงานในสภาวะดังกล่าว จะพบว่าเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับเหล็กออกไซด์ ใน pH 9 และ pH 11 แตกต่างกันตรงที่ pH 12 เหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้น มีเหลือที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง กรดแก่ (H₂SO₄) และเบสแก่ (NaOH) ทำให้ลักษณะทางพื้นฐานทางวิทยาของชิ้นงานมีลักษณะแตกต่างจาก pH 9 และ pH 11 ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับที่ pH 10

4.2.2 ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

จากการศึกษาที่ 4.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการผลิตไบโอแก๊ส ที่ความเข้มข้น 95% คือ การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และจากการศึกษา Zhu et al. (2012) พบว่าเหล็กประจุศูนย์ที่มีความเข้มข้นมากสามารถยับยั้งกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศ หรือมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้เนื่องจาก (1) การตกตะกอนของธาตุเหล็กบนเซลล์จุลินทรีย์ (2) เยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหายเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชันของเหล็กออกไซด์ และ (3) การก่อดัวของอนุมูล เช่น Oxygen จากปฏิกิริยา ZVI กับออกซิเจนที่ละลายใน cytoplasm เพื่อให้เกิดความเสียหายต่อจุลินทรีย์น้อยที่สุด การหาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยากับน้ำเสีย เพื่อให้เกิดเป็นไบโอแก๊สได้มากที่สุด เป็นทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์มีความสามารถในการเพิ่มขึ้นของไบโอแก๊ส (Xu et al., 2014)

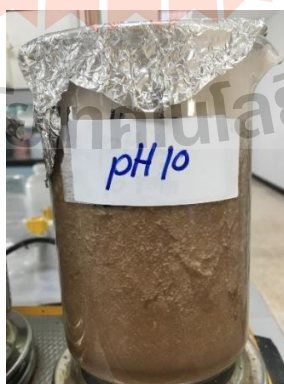
จากการศึกษาดังกล่าวทำให้การศึกษาในหัวข้อนี้ มุ่งเน้นศึกษาในเรื่องของปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมที่สุดต่อการเกิดไบโอแก๊ส ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

กำหนดให้

ตัวแปรต้น : ปริมาณเหล็ก

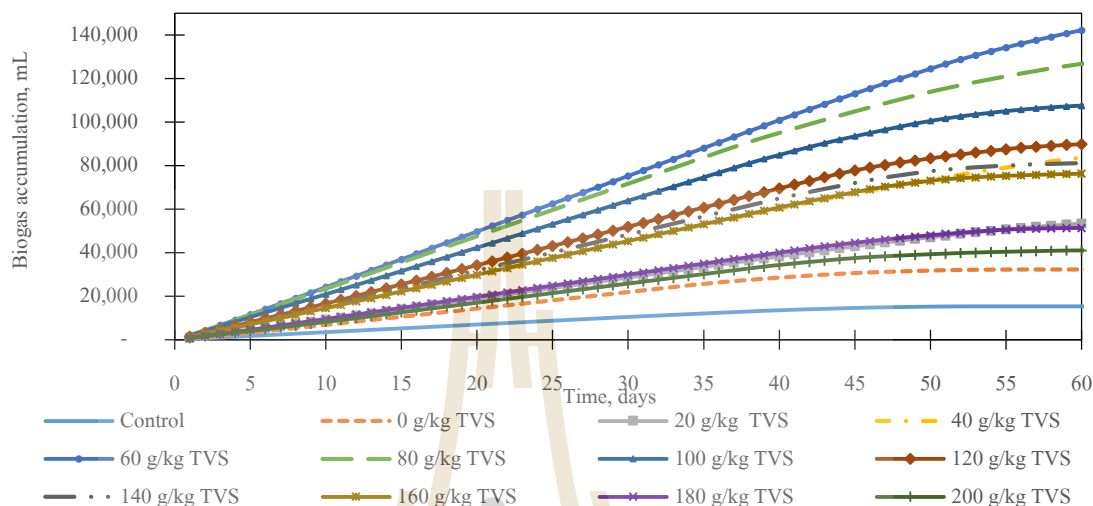
ตัวแปรตาม : ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้น

ตัวแปรควบคุม : pH อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา

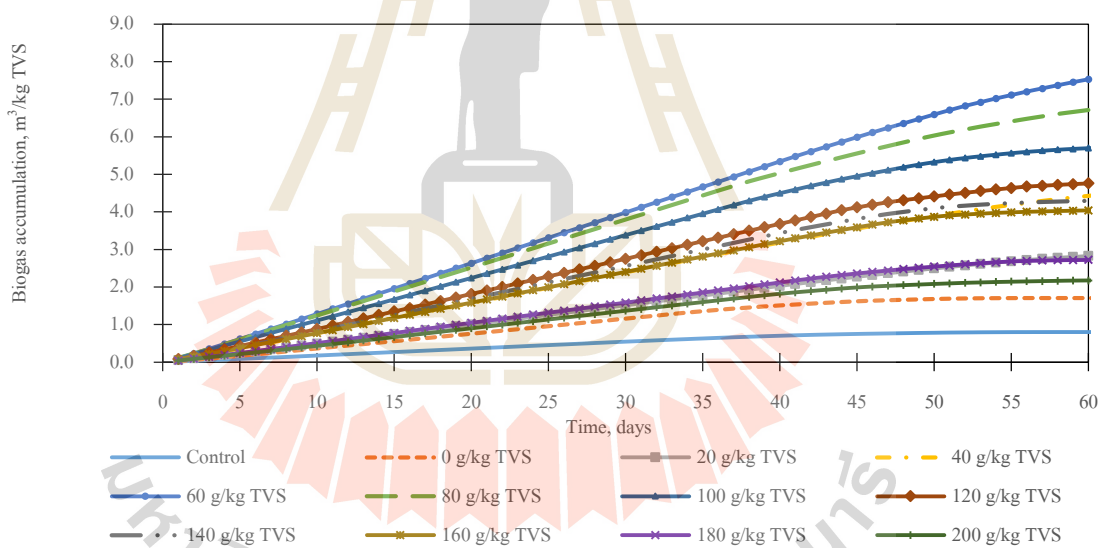


รูปที่ 4.23 การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยเบสที่ pH 10 , อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.2.2.1 ผลของการเกิดไบโอแก๊สเนื่องจากเหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ



(ก) ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (mL) ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน



(ข) อัตราการเกิดไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน

รูปที่ 4.24 (ก) ปริมาณไบโอแก๊สที่สะสม (ข) อัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสม ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง pH 10 , อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 20 - 200 g/kg TVS

จากกราฟรูปที่ 4.24 ผลจากการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยเบสที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เพื่อหาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สที่สุด พบว่าปริมาณไบโอแก๊สที่สะสมและอัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสมในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ที่สภาวะควบคุม มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 0.801 m³/kg TVS และจากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS มีแนวโน้มอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้นเรื่อยๆ สามารถผลิตไบโอแก๊สมีค่ามากกว่าการใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้นอื่นๆ มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดคือ 7.530 m³/kg TVS และมีค่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าสภาวะควบคุม 840.79%, ZVI 20 g/kg TVS 166.77%, ZVI 40 g/kg TVS 70.17%, ZVI 80 g/kg TVS 12.28%, ZVI 100 g/kg TVS 32.39%, ZVI 120 g/kg TVS 58.37%, ZVI 140 g/kg TVS 75.34%, ZVI 160 g/kg TVS 86.46%, ZVI 180 g/kg TVS 176.95% และ ZVI 200 g/kg TVS 246.46% จากการทดสอบทางสมมติฐาน โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ที่นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะพบว่าเหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดแตกต่างจากทุกๆสภาวะแสดงดังตารางที่ 4.9 - 4.10 จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังคือ 60 g/kg TVS

สอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang et al. (2014) ที่ทำการศึกษการเพิ่มขึ้นของไบโอแก๊สสำหรับกากตะกอนน้ำเสียโดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้นแตกต่างกัน 7 ความเข้มข้น คือ 0, 10, 60, 80, 100, 140 และ 200 g/kg VSS ผลจากการศึกษาพบว่าเหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 0 g/kg VSS ให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สภายหลังการหมักแบบไร้อากาศที่เวลา 50 วัน คือ 0.146 m³/kg VSS และสภาวะที่ให้การผลิตไบโอแก๊สสูงสุด คือเหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg VSS โดยให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สภายหลังการหมักแบบไร้อากาศที่เวลา 50 วัน คือ 0.280 m³/kg VSS ซึ่งมากกว่าสภาวะควบคุมหรือความเข้มข้น 0 g/kg VSS 91.80% นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้ทำอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้น ในทางกลับกัน ยังส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สลดลง เมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นเหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg VSS คาดว่าปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถยับยั้งกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศ (Zhu et al., 2012) หรือมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้เนื่องจาก (1) การตกตะกอนของธาตุเหล็กบนเซลล์จุลินทรีย์ (2) เยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหายเนื่องจากกระบวนการออกซิไดส์ของเหล็กออกไซด์ และ (3) การก่อตัวของอนุมูล เช่น Oxygen จากปฏิกิริยา NZVI กับออกซิเจนที่ละลายใน cytoplasm (Zhu et al., 2012) เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อจุลินทรีย์การเพิ่มความเข้มข้นของกากตะกอนและปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่ละน้อยๆ จะมีผลกระทบน้อยที่สุด (Xu et al., 2014)

4.2.2.2 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ

ทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Statistical hypothesis) การใช้โปรแกรมประยุกต์ทางสถิติ SPSS for Windows ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาความสัมพันธ์ของ pH แต่ละ pH กับปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลาในการหมัก 60 วัน และทำการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparison) เพื่อหาคู่ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ (Post hoc test) โดยใช้วิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) เขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

สมมติฐานทางสถิติ : $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$
 $H_1 :$ อย่างน้อยเฉลี่ย 2 ค่า หรือ 1 คู่ แตกต่างกัน

เมื่อกำหนดให้

H_0 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05
 H_1 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ที่นัยสำคัญ 0.05
 μ คือ ค่าเฉลี่ยไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละ Condition

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant
Between Groups	118033610.411	10	11803361.041	3066.376	0.000
Within Groups	1270264.516	330	3849.286		
Total	119303874.927	340			

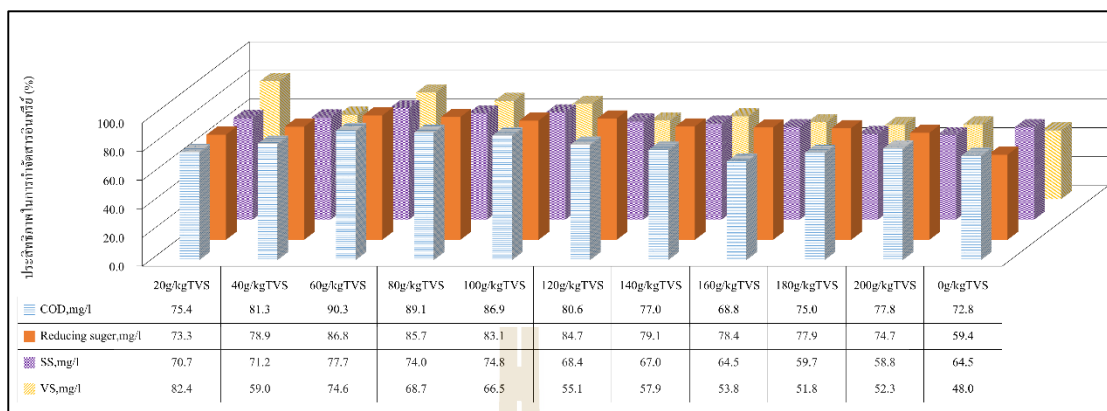
จากตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติ พบว่า มีค่า Significant = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 และยอมรับ H_1 คือ อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่เหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้นต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน จึงมีการทดสอบ Post hoc test โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) เพื่อหาว่าคู่ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบ Post Hoc ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

(I) ZVI	(J) ZVI	Sig.	(I) ZVI	(J) ZVI	Sig.	(I) ZVI	(J) ZVI	Sig.
40 g/kg TVS	0 g/kg TVS	0.000	60 g/kg TVS	0 g/kg TVS	0.000	80 g/kg TVS	0 g/kg TVS	0.000
	20 g/kg TVS	0.000		20 g/kg TVS	0.000		20 g/kg TVS	0.000
	60 g/kg TVS	0.000		40 g/kg TVS	0.000		40 g/kg TVS	0.000
	80 g/kg TVS	0.000		80 g/kg TVS	0.000		60 g/kg TVS	0.000
	100 g/kg TVS	0.000		100 g/kg TVS	0.000		100 g/kg TVS	0.078
	120 g/kg TVS	0.000		120 g/kg TVS	0.000		120 g/kg TVS	0.000
	140 g/kg TVS	0.635		140 g/kg TVS	0.000		140 g/kg TVS	0.000
	160 g/kg TVS	0.150		160 g/kg TVS	0.000		160 g/kg TVS	0.000
	180 g/kg TVS	0.000		180 g/kg TVS	0.000		180 g/kg TVS	0.000
200 g/kg TVS	0.000	200 g/kg TVS	0.000	200 g/kg TVS	0.000			
* 0 g/kg TVS คือ Control (ชุดควบคุม) (อ้างอิงจากผลการศึกษาในภาคผนวก)								

จากตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบ Post hoc test ของแต่ละกลุ่มตัวอย่างเทียบกันด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) จะพบว่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สที่เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS เป็นเพียงสถานะเดียว ที่มีค่า Significant = 0.000 หรือ น้อยกว่า 0.05 เมื่อเทียบกับทุกการทดลอง หมายความว่า การย่อยสลายกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C เวลา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุด แตกต่างจากทุกสถานะ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง คือการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C เวลา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

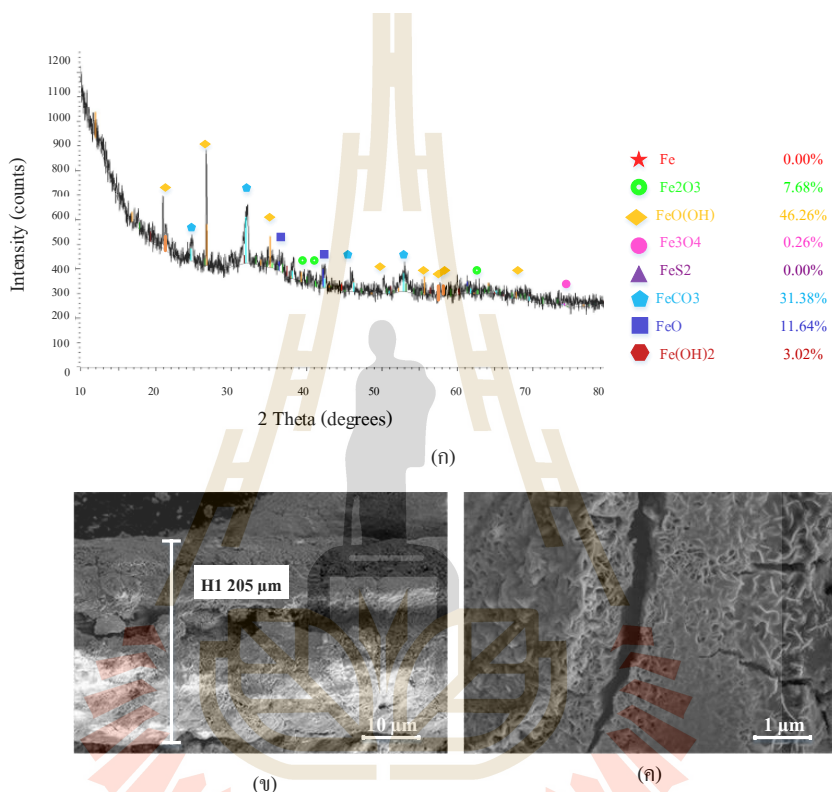


รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%) ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

จากรูปที่ 4.25 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD อยู่ในช่วง 68.75 - 90.27% น้ำตาลรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 57.51-87.28% ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) อยู่ในช่วง 58.77 - 77.75% และของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) อยู่ในช่วง 51.83 - 73.13% โดยที่ ในสภาวะการไฮโดรไลซิสจากมันสำปะหลังที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงที่สุด

4.2.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กประจุศูนย์ จากการศึกษาความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส ภายหลังจากหมักเป็นเวลา 60 วัน

ออกไซด์ของเหล็กประจุศูนย์ภายหลังจากการให้อิเล็กตรอนหรือเกิดการกัดกร่อน มีลักษณะของออกไซด์ที่เกิดขึ้นในรูปแบบที่แตกต่างกันไป อธิบายได้ดังรูปที่ 4.26 – 4.35



รูปที่ 4.26 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 20 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	0.00%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	7.68%
FeOOH (Fe ³⁺)	46.02%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.26%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.00%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	31.38%
FeO (Fe ²⁺)	11.64%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	3.02%

จากรูปที่ 4.26 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 20 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 53.70% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 46.04% ออกไซด์ของเหล็กส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe³⁺) และ FeCO₃ (Fe²⁺) ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของเหล็ก โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ H₂ โดย H₂ ที่เกิดขึ้นสามารถผลิตไบโอแก๊สได้ (Yang et al, 2013) ดังแสดงในสมการที่ (4-76) – (4-77)



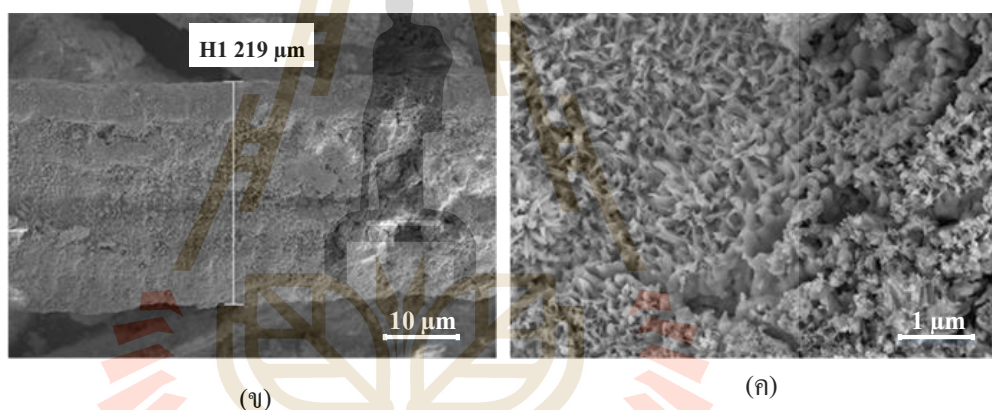
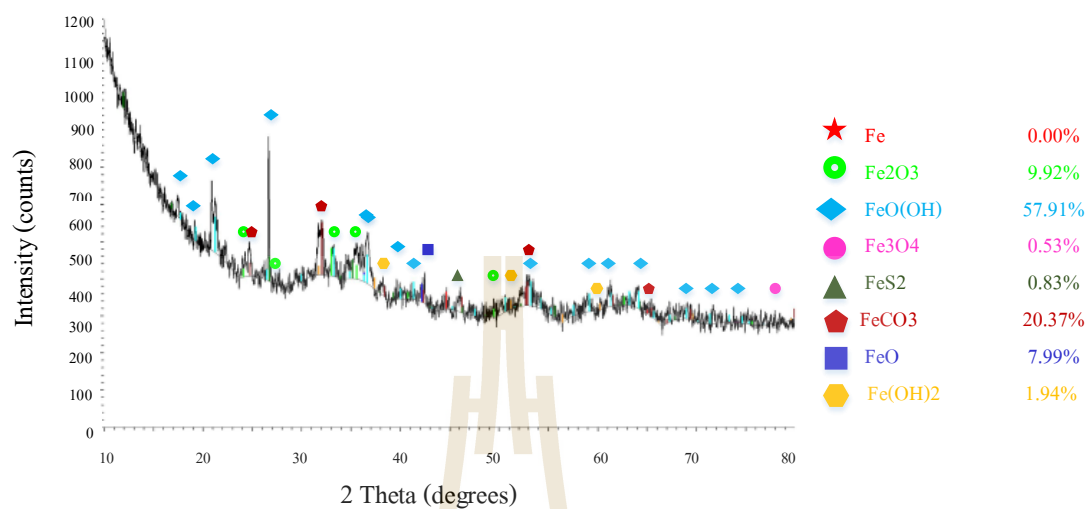
นอกจากนี้ในการสร้างอะซิเตดนั้น ยังจำเป็นต้องใช้ CO₂/H₂ เป็นแหล่งสร้างพลังงาน ดังสมการที่ (4-78) เพื่อให้เกิดไบโอแก๊สในระบบ ดังสมการที่ (4-79)



การเพิ่มเหล็กประจุศูนย์เข้าสู่ระบบ จึงมีส่วนช่วยในการผลิต H₂ มากขึ้นและมีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนหนึ่ง ในการผลิต CH₄ คาดว่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนจะเพิ่มขึ้นในขณะที่การเกิด methanogenesis แบบอัตโนมัติด้วยการใช้ H₂ เป็นแหล่งพลังงานไม่เพียงพอต่อสร้าง CH₄ (Thauer et al, 1977) ดังแสดงในสมการที่ (4-80)



จากปฏิกิริยากังกล่าวเป็นการเร่งการกัดกร่อนเหล็กประจุศูนย์ ทำให้เหล็กประจุศูนย์ที่อยู่ในระบบเหลือ 0% เท่านั้น ผลลัพธ์ที่ได้จาก XRD pattern แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า Fe⁰ ความเข้มข้น 20 g/kg TVS สามารถทำหน้าที่เป็นให้อิเล็กตรอนสำหรับการผลิตแก๊ส CH₄

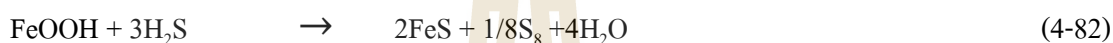


รูปที่ 4.27 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 40 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	0.00%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	9.92%
FeOOH (Fe ³⁺)	57.91%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.53%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.83%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	20.88%
FeO (Fe ²⁺)	7.99%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	1.94%

จากรูปที่ 4.27 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 40 g/kg TVS

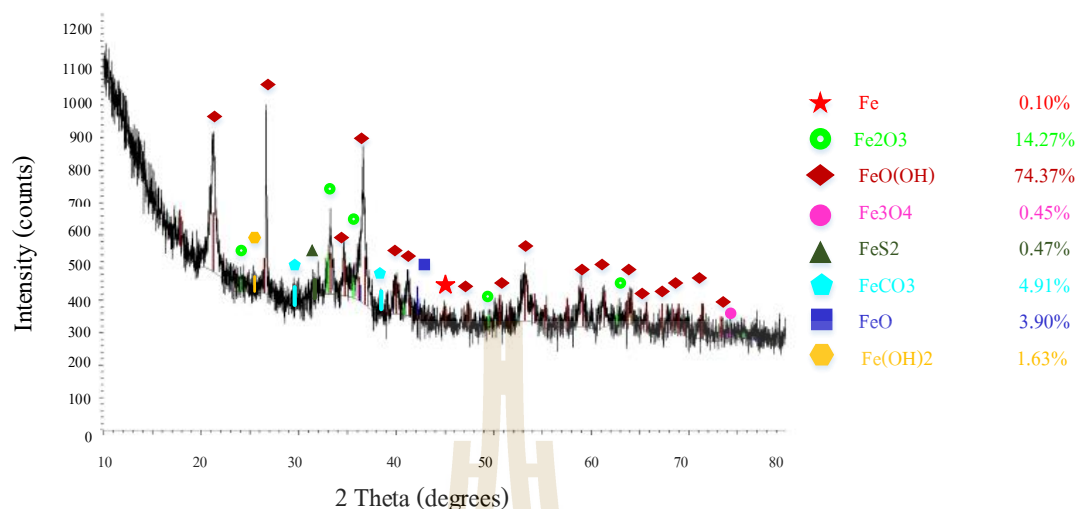
ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 68.66% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 30.81% โดยที่เหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe³⁺) ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวกลางอิเล็กตรอนที่มีประสิทธิภาพและสามารถเร่งการขนส่งอิเล็กตรอนเมื่อถูกดูดซับบนผิว ZVI ในเวลาเดียวกันอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้นด้วย (Skovhus et al., 2005; Liu et al. 2006) แสดงดังสมการที่ (4-81) – (4-83)



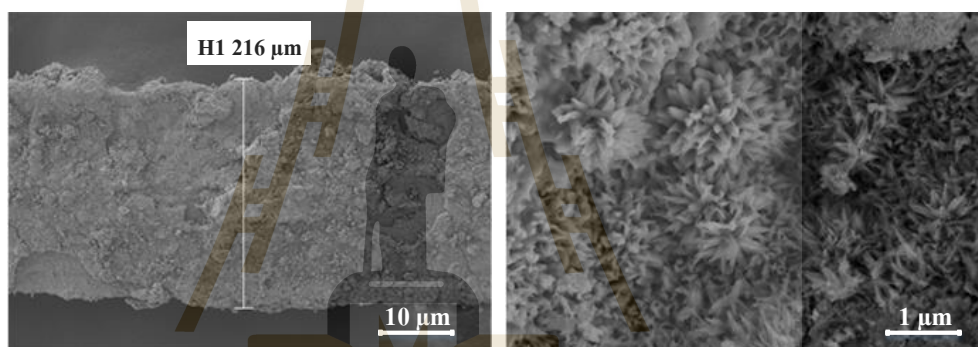
ในสภาวะดังกล่าวจึงมีปริมาณของ FeOOH อยู่ในปริมาณที่สูง เนื่องจากพื้นที่บริเวณเหล็กประจุศูนย์ ถูกใช้ในการเกิดไบโอแก๊สอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความเสถียรของระบบที่ไม่มี H₂S มารบกวนจุลินทรีย์การผลิตไบโอแก๊ส และเนื่องจากอัตราการใช้เหล็กประจุศูนย์มีไม่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำ เหล็กประจุศูนย์ที่ตรวจพบ เหลือ 0% ผลลัพธ์ที่ได้จาก XRD pattern แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า Fe⁰ ความเข้มข้น 40 g/kg TVS สามารถทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนสำหรับการผลิตแก๊ส CH₄

เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่ถูกยับยั้งหรือรบกวน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็ก จึงประกอบไปด้วยออกไซด์ของเหล็กในรูปแบบต่างๆ และส่วนมากจะมีการเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ ซึ่งถือว่าเป็น pattern การเรียงตัวของ FeOOH

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก)



(ข)

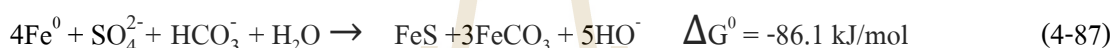
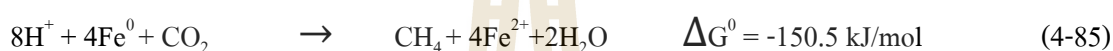
(ค)

รูปที่ 4.28 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ซึ่งงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	0.10%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	14.27%
FeOOH (Fe ³⁺)	74.37%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.45%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.47%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	4.81%
FeO (Fe ²⁺)	3.90%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	1.63%

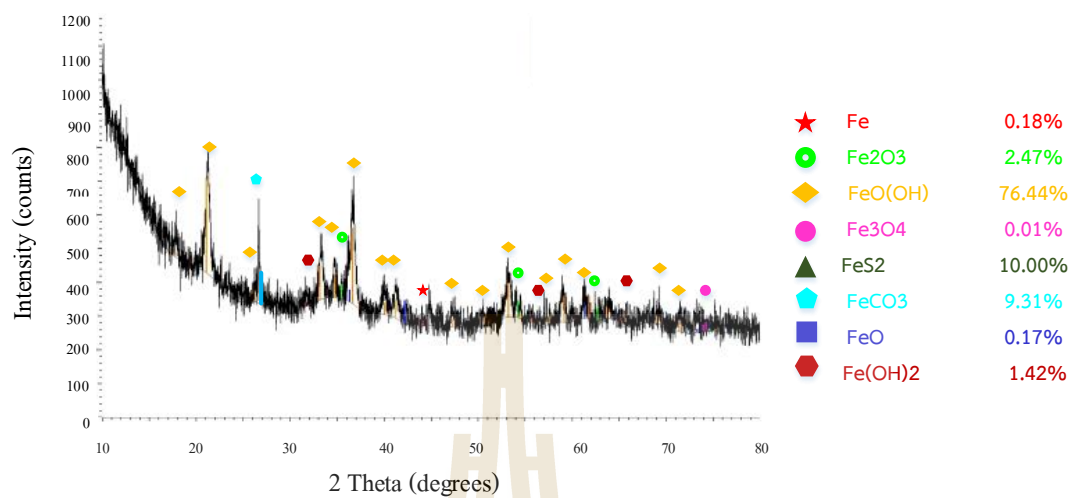
จากรูปที่ 4.28 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 89.11% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 10.34% โดยที่เหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe³⁺) แต่มีปริมาณของเหล็กประจุศูนย์เหลืออยู่ 0.1% แสดงให้เห็นว่า เหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้น 60 g/kg TVS ไม่ได้ถูกใช้ไปจนหมดใน ทั้งในรูปของการผลิต CH₄ และการกำจัด H₂S ในระบบ ดังแสดงในสมการที่ (4-84) – (4-89)

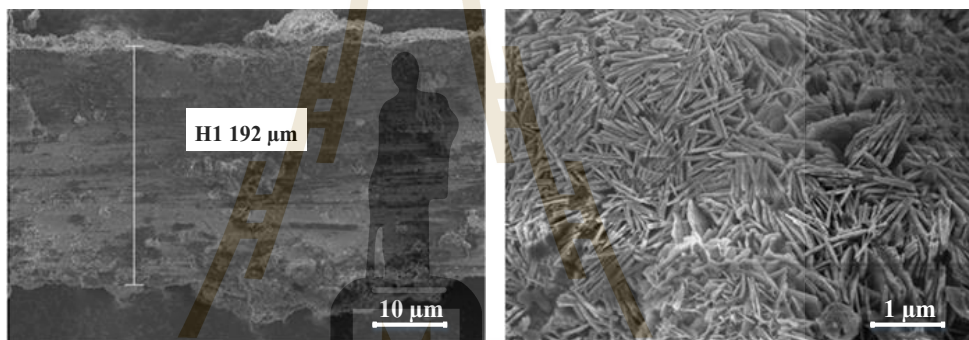


ความเข้มข้นของเหล็กที่ 60 g/kg TVS ทำปฏิกิริยาพอดีกับ การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ กล่าวคือ ความเข้มข้นของเหล็กไม่ได้มีผลในการทำลายเนื้อเยื่อของจุลินทรีย์ จึงไม่ได้มีผลในการยับยั้งการผลิตไบโอแก๊ส และนอกจากนี้ ปริมาณไบโอแก๊สที่ศึกษา มีปริมาณเหล็กประจุศูนย์เหลืออยู่ 0.10% นอกจากนั้นอยู่ในรูปของออกไซด์ประเภท FeOOH (Fe³⁺) ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของเหล็กอีกตัวหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไป ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น มลทินที่ติดอยู่ในบนชิ้นงานเหล็กประจุศูนย์ ก็จะมากขึ้น (Karri et al., 2005)

จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานในสภาวะนี้ จึงมีลักษณะเป็นหินข้อยคล้ายกับพื้นผิวของสิ่งประดิษฐ์เหล็ก มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กระบายหลวมๆ คล้ายกลีบดอกไม้เล็กๆ แต่อาจมีลักษณะสั้นยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการกัดกร่อน (Zise et al., 2007) บ่งบอกได้ถึง การเปลี่ยนรูปของเหล็กประจุศูนย์อย่างสมบูรณ์



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.29 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 80 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

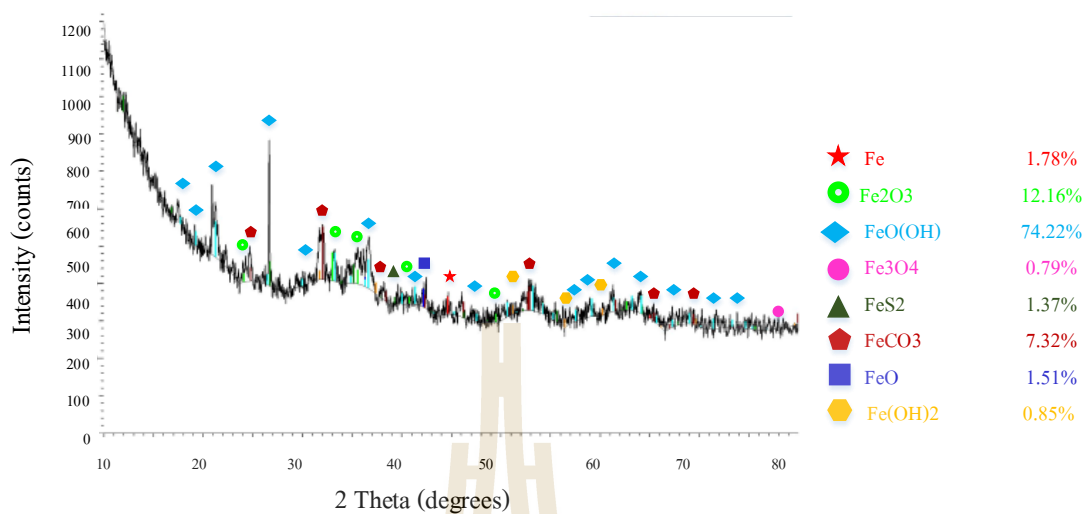
Fe	0.18%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	2.47%
FeOOH (Fe ³⁺)	76.44%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.01%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	10.00%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	9.75%
FeO (Fe ²⁺)	0.17%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	1.42%

จากรูปที่ 4.29 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 80 g/kg TVS

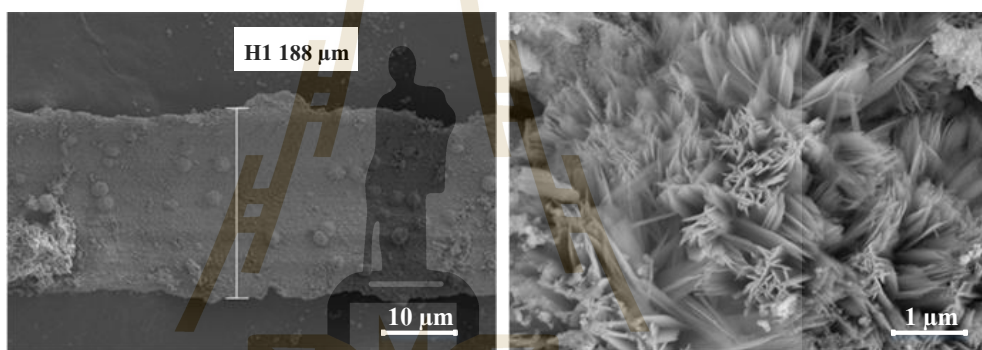
ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 88.91% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 11.34% โดยที่เหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe³⁺) แต่มีปริมาณของเหล็กประจุศูนย์เหลืออยู่ 0.18% มีลักษณะเช่นเดียวกับ เหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้น 60 g/kg TVS กล่าวคือเหล็กประจุศูนย์ไม่ได้ถูกใช้ไปจนหมดใน ทั้งในรูปของการผลิต CH₄ และการกำจัด H₂S ในระบบ แต่กลับให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ต่ำกว่าที่ความเข้มข้น 60 g/kg TVS

สอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang et al. (2014) ที่ทำการศึกษาความเข้มข้นของกากตะกอนและความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส จากการศึกษาที่มีการทดสอบความเข้มข้นของกากตะกอน 2 ความเข้มข้น และมีปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษา 7 ความเข้มข้น คือ 0, 10, 60, 80, 100, 140 และ 200 g/kg VSS ผลจากการทดสอบพบว่าเหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg VSS ให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุด โดยสูงกว่าสภาวะควบคุม 23.42% โดยที่ความเข้มข้นเหล็กที่สูงขึ้น มีผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ปริมาณเหล็กส่วนเกินทำให้เนื้อเยื่อของจุลินทรีย์ถูกทำลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กประจุศูนย์ที่เวลา 50 วัน จึงไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากปริมาณ H₂ ที่ต้องการมีปริมาณที่มากเกินไป ความเป็นกรดที่เกิดขึ้นจากการให้อิเล็กตรอนของ Fe⁰ มีความเป็นกรดสูง จึงทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ กลุ่มผลิตแก๊ส CH₄ (Zhang et al., 2014) แสดงได้ดังสมการที่ (4-90)





(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.30 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

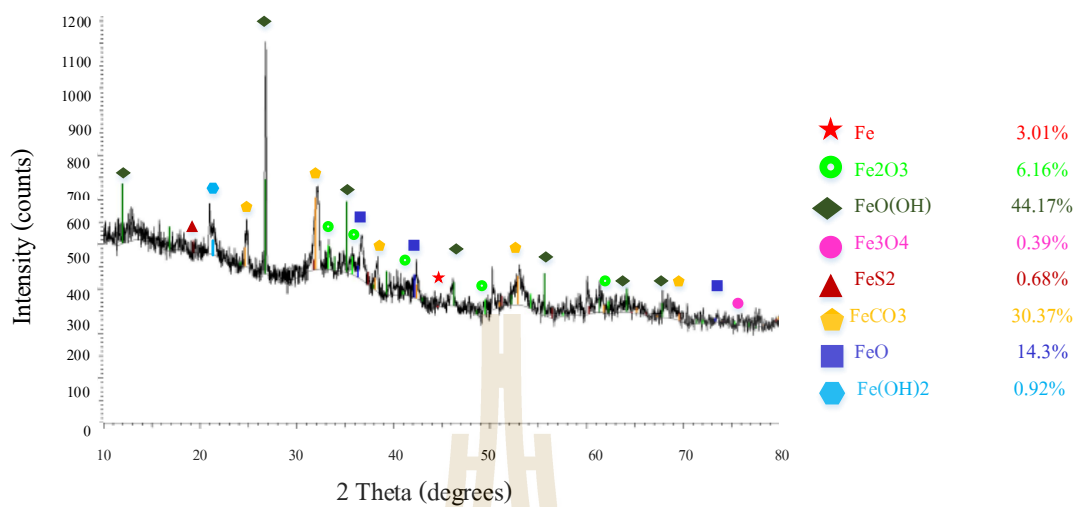
Fe	1.78%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	12.16%
FeOOH (Fe ³⁺)	74.22%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.79%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.37%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	7.32%
FeO (Fe ²⁺)	1.51%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	0.85%

จากรูปที่ 4.30 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS

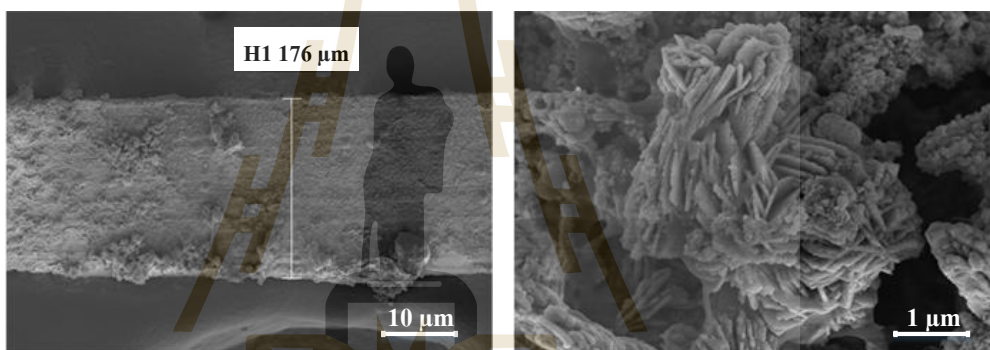
ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 87.75% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 9.68% โดยที่เหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ $FeOOH (Fe^{3+})$ แต่มีปริมาณของเหล็กประจุศูนย์เหลืออยู่ 1.78% มีลักษณะเช่นเดียวกับ เหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้น 60 g/kg TVS กล่าวคือเหล็กประจุศูนย์ไม่ได้ถูกใช้ไปจนหมดใน ทั้งในรูปของการผลิต CH_4 และการกำจัด H_2S ในระบบ แต่กลับให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ต่ำกว่าที่ความเข้มข้น 60 g/kg TVS

คาดว่าปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถยับยั้งกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศ (Zhu et al., 2012) หรือมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้เนื่องจาก (1) การตกตะกอนของธาตุเหล็กบนเซลล์จุลินทรีย์ (2) เยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหายเนื่องจากกระบวนการออกซิไดซ์ของเหล็กออกไซด์ และ (3) การก่อด่างของอนุมูล เช่น Oxygen จากปฏิกิริยา NZVI กับออกซิเจนที่ละลายใน cytoplasm (Zhu et al., 2012) อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ความเข้มข้น 100 g/kg TVS จึงต่ำกว่า เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานดังกล่าว มีลักษณะคล้ายคริสตอลที่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ สอดคล้องกับการศึกษา Zhu et al. (2014) ศึกษาการก่อด่างของเหล็กประจุศูนย์ขนาด 100 – 180 mesh, 100 mesh และ 350 nm และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของจุลินทรีย์ ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน ผลจากการศึกษาพบว่าเหล็กประจุศูนย์ที่มีขนาดเล็กขนาดนาโน มีผลต่อการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในการผลิตไบโอแก๊สมากกว่าเหล็กประจุศูนย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดเล็กของอนุภาคเหล็กสามารถตกตะกอนบนเซลล์ของจุลินทรีย์ เมื่อเกิดการออกซิไดซ์ เยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหาย ส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ความเข้มข้นสูง มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มข้นเหล็กประจุศูนย์ 1000 g/kg VSS ซึ่งเป็นความเข้มข้นเหล็กที่สูงที่สุดในการทดลอง ของอนุภาคทั้ง 3 ขนาด ให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่ต่ำ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพบออกไซด์ของเหล็กในรูปของ $FeOOH$



(ก)



(ข)

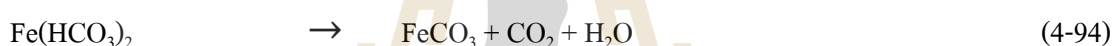
(ค)

รูปที่ 4.31 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 120 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	3.01%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	6.16%
FeOOH (Fe ³⁺)	44.17%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.39%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.68%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	30.37%
FeO (Fe ²⁺)	14.30%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	0.92%

จากรูปที่ 4.31 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 120 g/kg TVS

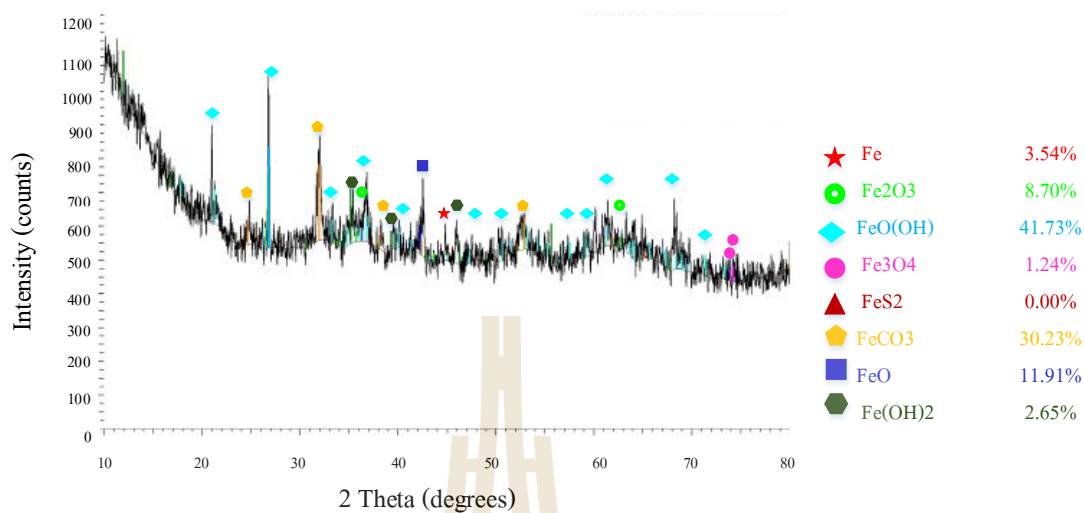
ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 51.01% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 45.59% โดยมีเหล็กประจุศูนย์เหลืออยู่ 3.01% จากการศึกษาดังกล่าว พบว่า ออกไซด์ของเหล็กอยู่ในรูปของ FeOOH (Fe³⁺) และ FeCO₃ (Fe²⁺) เป็นส่วนมาก ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กพบว่าเซลล์แบคทีเรียที่เป็นอนุภาคเหล็กออกซิไดซ์ โดยทั่วไปจะถูกรวมบนพื้นผิวเหล็กครอบคลุมเกือบ 70% ซึ่งส่งผลให้เกิดการก่อตัวของ tubercles ขนาดเล็กโดยการก่อตัวของ FeCO₃ (Rao et al., 2000) ดังสมการที่ (4-91) - (4-94)



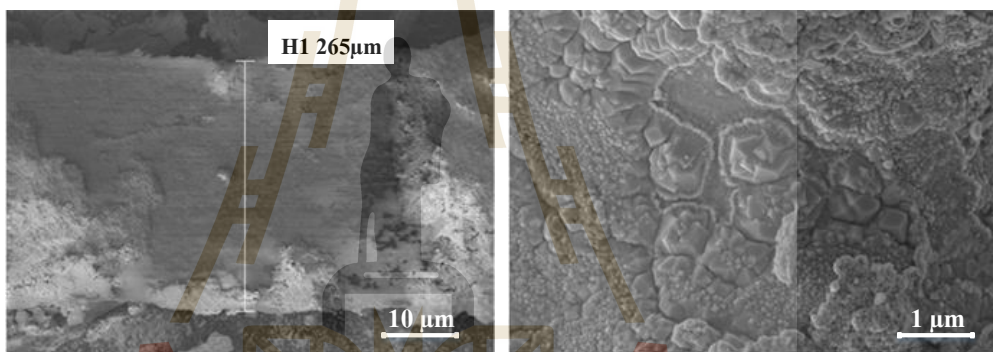
นอกจากนี้ จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยายังพบว่าเหล็กออกไซด์มีลักษณะคล้ายเมือกไบโอฟิล์ม เคลือบอยู่ทั่วทั้งบริเวณ อาจกล่าวได้ว่า เมื่อเหล็กประจุศูนย์ที่มีปริมาณมากเกินพอให้อิเล็กตรอน เกิดเป็น H₂ ดังสมการที่ (4-95)



อาจก่อให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรด และกลุ่มที่สร้างมีเทน เนื่องจากสภาวะในการทำงานไม่เอื้ออำนวย อีกทั้งปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ที่มากเกินพอยังทำลายเนื้อเยื่อของจุลินทรีย์ เมื่อมีการออกซิไดส์เหล็กไปอยู่ในออกไซด์รูปต่างๆ และยังพบว่า เหล็ก Fe²⁺ ที่มากเกินพอ สามารถทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ได้โดยตรง อัตราการผลิตไบโอแก๊สจึงต่ำเมื่อความเข้มข้นของเหล็กเพิ่มสูงขึ้น (Enning et al., 2012)



(ก)



(ข)

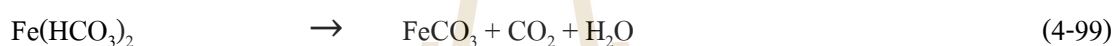
(ค)

รูปที่ 4.32 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 140 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ขึ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	3.54%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	8.70%
FeOOH (Fe ³⁺)	41.73%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	1.24%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.00%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	30.23%
FeO (Fe ²⁺)	11.91%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	2.65%

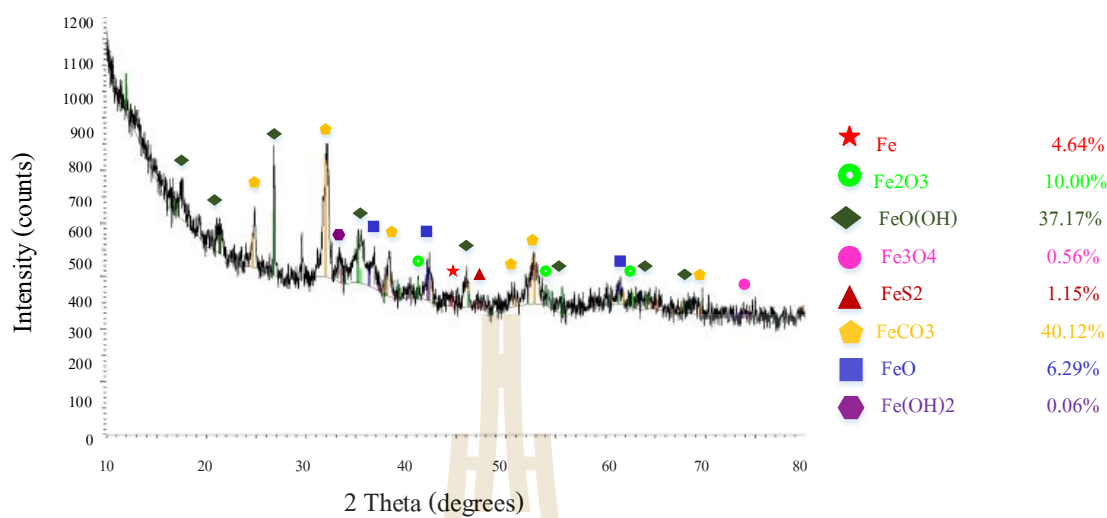
จากรูปที่ 4.32 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 140 g/kg TVS

ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 50.44% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 44.79% โดยมีปริมาณเหล็กประจุศูนย์คงเหลือ 3.54% ลักษณะผลึกของเหล็กออกไซด์ประเภท FeCO₃ ทางสถาบันวิทยาบ่งชี้ว่าอัตราการคัดกร่อนมีลักษณะแบบแปลน (เมื่อพิจารณาพื้นผิว) (Sim et al., 2014) โดยที่ Fe²⁺ ที่เกิดจากการให้อิเล็กตรอน ดังแสดงในสมการที่ (4-96) ถูกนำไปใช้ในการสร้าง FeCO₃ ดังสมการที่ (4-97) – (4-99)

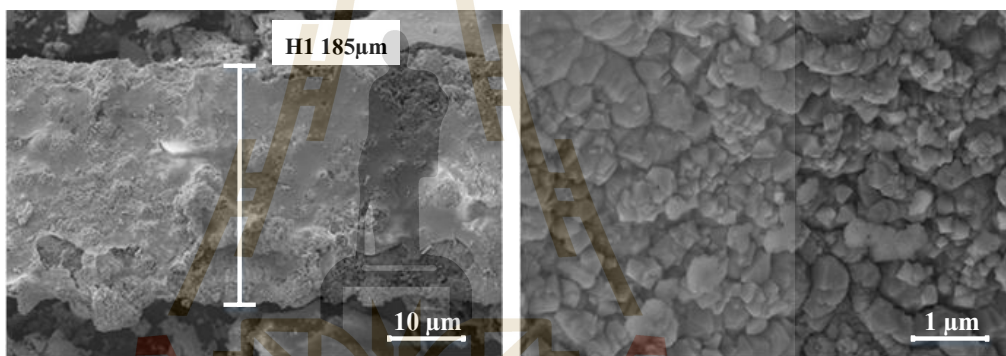


จากข้อมูล XRD จึงพบว่าเหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeCO₃ และปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหลืออยู่มีปริมาณมาก เมื่อเทียบกับความเข้มข้น 60 g/kg TVS เรื่องนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่สูง ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของเหล็กประจุศูนย์ที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ ZVI กับ VFAs มากเกินไปในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้ระบบมีความเป็นกรดสูง จุลินทรีย์ที่ผลิตไบโอแก๊สไม่ทำงาน อัตราการผลิตไบโอแก๊สจึงต่ำ แสดงดังสมการที่ (4-100) – (4-101) VFA / ALK = 0.3 - 0.4 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบแบบไร้อากาศ ซึ่งจะมีความเสี่ยงต่อการเป็นกรดน้อยที่สุด (Shahriari et al., 2013; Elbeshbishy and Nakhla, 2011)





(ก)



(จ)

(ค)

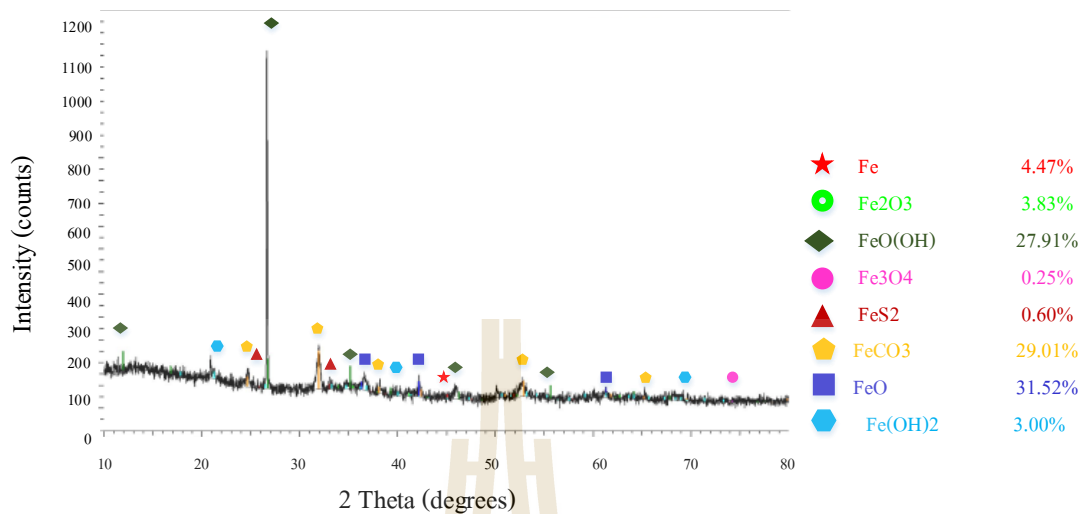
รูปที่ 4.33 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 160 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	4.64%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	10.00%
FeOOH (Fe ³⁺)	37.17%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.56%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.15%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	40.12%
FeO (Fe ²⁺)	6.29%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	0.06%

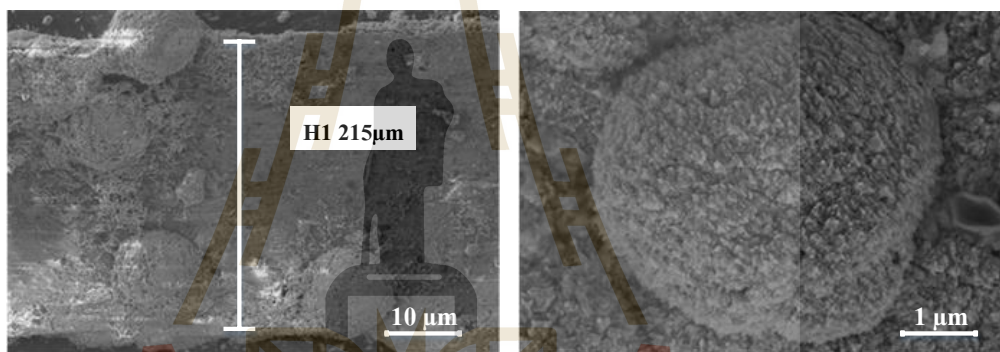
จากรูปที่ 4.33 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊ส จากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 160 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 52.32% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 46.47% และมีเหล็กประจุศูนย์อยู่ 4.64% ในสภาวะดังกล่าว ให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำกว่าที่ความเข้มข้นเหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS

จากการศึกษายังพบว่าปริมาณเหล็กประจุศูนย์เพิ่มขึ้น อัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำลง สอดคล้องกับจากการศึกษาของ Zhen et al. (2015) ศึกษาการผลิตไบโอแก๊ส โดยใช้ zero valent scrap iron (ZVSI) จากกากตะกอนในการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 ผลจากการศึกษาพบว่า ปริมาณเหล็ก ZVSI เพิ่มมากขึ้น อัตราการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้น โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น ดังต่อไปนี้ 0, 50, 100, 250, 500 และ 1,000 g/kg VSS สามารถผลิตกรดไขมันระเหยง่ายได้ 2059.9 ± 110.8 , 2114.7 ± 40.1 , 2121.5 ± 35.0 , 2156.0 ± 11.2 , 2195.9 ± 10.8 and 2340.4 ± 73.0 mg/L ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นที่ให้ปริมาณไบโอแก๊สได้สูงสุด คือ ZVSI 500 g/kg VSS ให้อัตราการผลิตไบโอแก๊ส $0.175 \text{ m}^3/\text{kg VSS}$ สูงกว่าที่สภาวะที่ไม่มีการเติมเหล็ก 38.3% จากการศึกษาดังกล่าว ซึ่งให้เห็นว่า ปริมาณ VFA ที่สูง และมี VFA / ALK มากกว่า 0.3 - 0.4 จะส่งผลต่ออัตราการผลิตไบโอแก๊ส เนื่องจากความเป็นกรดที่มากเกินไป เช่นเดียวกับที่ความเข้มข้น 140 g/kg TVS





(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.34 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 180 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

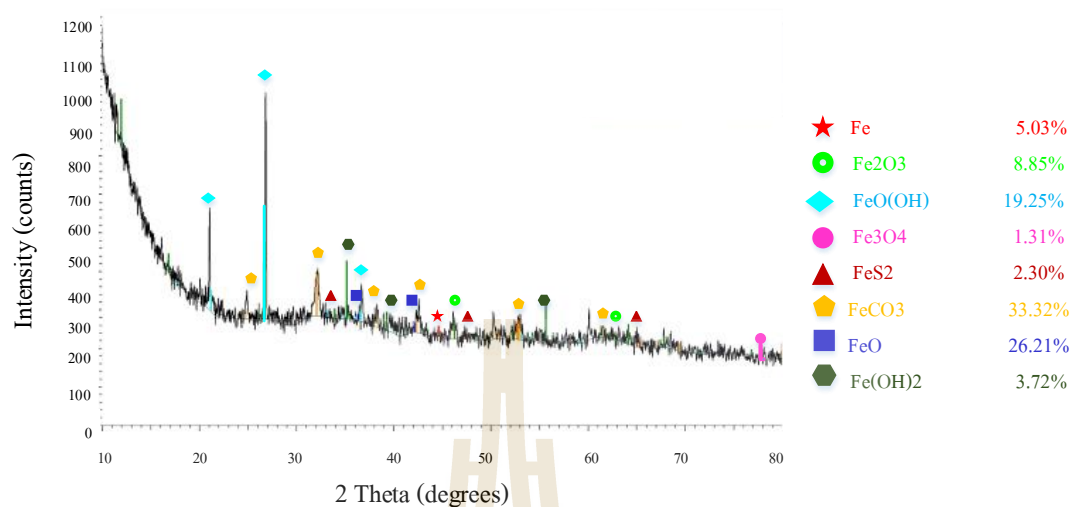
Fe	4.47%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	3.38%
FeOOH (Fe ³⁺)	27.91%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.25%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.60%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	29.01%
FeO (Fe ²⁺)	31.52%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	3.00%

จากรูปที่ 4.34 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 180 g/kg TVS

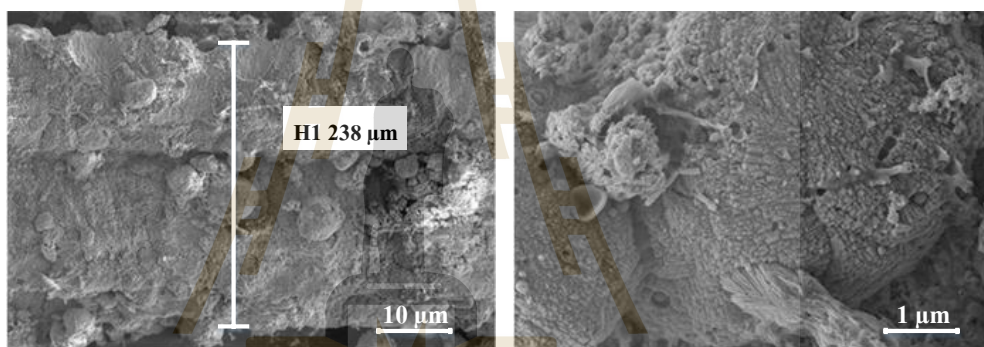
ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 31.89% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 63.53% ออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeO (Fe²⁺) และ FeCO₃ (Fe²⁺) แสดงการเกิดออกไซด์ของเหล็กดังกล่าวดังสมการ (4-102) – (4-109)



ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Wu et al. (2015) ทำการศึกษาความเข้มข้นของเหล็ก 0, 3, 7, 15, 25 และ 50 g/L ที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ การวิเคราะห์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กที่เป็นของแข็งในตะกอนเพิ่มขึ้นตามปริมาณ ZVI ที่เพิ่มขึ้น ชีวนานถูกกัดกร่อน เหล็กครอบคลุมพื้นผิวของจุลินทรีย์ที่ทำงานได้และทำให้เกิดความเสียหายกับเชื้อแผ่นเมื่ออัตราส่วน เหล็กเข้มข้นเท่ากับ 50 g/L การค้นพบนี้ยังอธิบายการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่ความเข้มข้น ZVI สูง ส่งผลกระทบเชิงลบต่อการผลิตไบโอแก๊ส การกัดกร่อนเพิ่มขนาดใหญ่ เนื่องจากจำนวน ZVI ต่อจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนมีปริมาณไม่เหมาะสม



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.35 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 200 g/kg TS ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	5.03%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	8.85%
FeOOH (Fe ³⁺)	19.25%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	1.31%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	2.30%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	33.32%
FeO (Fe ²⁺)	26.21%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	3.72%

จากรูปที่ 4.35 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 200 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 30.40% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 68.25% ออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeCO₃ (Fe²⁺) แสดงการเกิดออกไซด์ของเหล็กดังกล่าวดังสมการ (4-110) – (4-116)



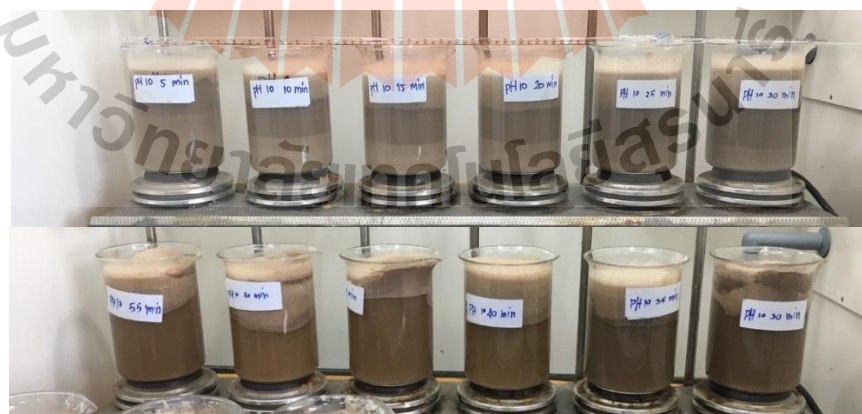
ลักษณะพื้นฐานวิทยาของเหล็กที่ความเข้มข้น 200 g/kg TVS มีลักษณะคล้ายกับที่ความเข้มข้น 180 g/kg TVS กล่าวคือ พบจุลินทรีย์ที่ทำงาน อยู่ตามบริเวณออกไซด์ของเหล็ก เนื่องจากปริมาณเหล็กที่มากเกินไป เข้าไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Wu et al. (2015) และ Zhen et al. (2015)

4.2.3 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการผลิตไบโอแก๊ส คือ สภาวะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และจากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2.2 ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สมากที่สุด ภายหลังสภาวะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที คือที่ความเข้มข้นเหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS และจากงานวิจัยของ kong et al. (2017) พบว่าเมื่อเติมเหล็กประจุศูนย์เข้าสู่ระบบ ปริมาณกรดอะซิติก และ โพรไพโอนิก ในระบบ มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณไบโอแก๊สสะสมในระบบเพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุมถึง 41.7% เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กประจุศูนย์และกรดไขมันระเหยง่าย ในรูปของโพรไพโอนิกและบิวทิริก

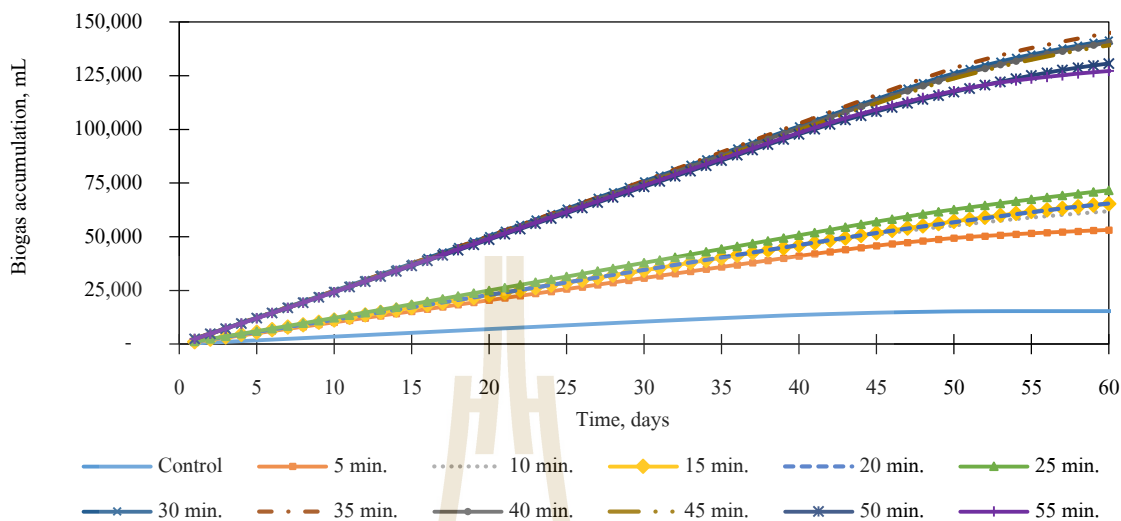
จากข้อมูลดังกล่าวทำให้การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5-55 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

กำหนดให้ ตัวแปรต้น : เวลาในการทำปฏิกิริยา
 ตัวแปรตาม : ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้น
 ตัวแปรควบคุม : pH 10, ZVI 60 g/kg TVS และ อุณหภูมิ 100 °C

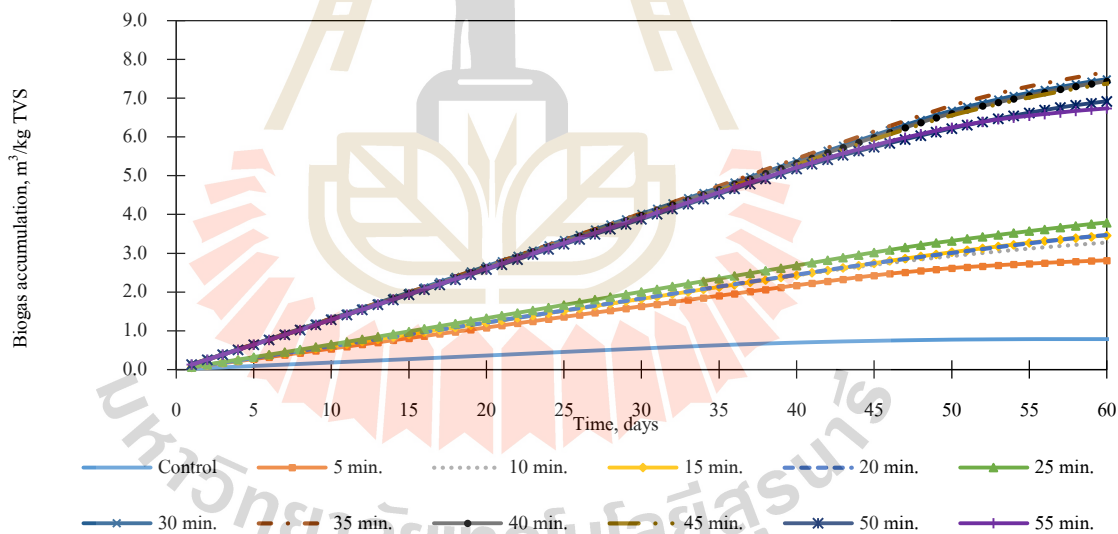


รูปที่ 4.36 การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ด้วยค่าที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5-55 นาที

4.2.3.1 ผลการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส



(ก) ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นในระบบการทดลองแบบกะ (Batch Test)



(ข) อัตราการไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นในระบบการทดลองแบบกะ (Batch Test)

รูปที่ 4.37 ก) ปริมาณไบโอแก๊สที่สะสม (ข) อัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสม ในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ที่ pH 10 , อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5-55 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 60 g/kg TVS

จากกราฟรูปที่ 4.37 ผลจากการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สภายหลังจากการไฮโดรไลซิซกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 60 g/kg TVS พบว่าปริมาณไบโอแก๊สที่สะสมและอัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสมในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากการไฮโดรไลซิซกากมันสำปะหลังที่ pH 10 , อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน จากการศึกษพบว่าที่สภาวะควบคุม มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 0.784m³/kg TVS สำหรับการย่อยสลายกากมันสำปะหลังที่เวลา 35 นาที มีแนวโน้มอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสามารถผลิตไบโอแก๊สสะสมได้สูงกว่าไบโอแก๊สที่การย่อยสลายกากมันสำปะหลังที่เวลาอื่นๆ โดยมีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุดคือ 7.669 m³/kg TVS และมีค่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าสภาวะควบคุม 879.15%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที 171.06%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที 132.25%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที 120.10%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที 119.03%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที 100.54%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที 1.66%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที 2.42%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที 3.37%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที 10.18% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 55 นาที 13.45% และจากการทดสอบทางสถิติโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ที่นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะพบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 35 และ 40 นาที มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังตารางที่ 4.11 - 4.12 จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปว่า ไม่ว่าจะทำการย่อยสลายกากมันสำปะหลังที่เวลาเท่าไรในทั้ง 3 ช่วงเวลา อัตราการเกิดไบโอแก๊สในระบบก็ไม่มีความแตกต่างกัน จึงสรุปได้ว่า ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดทั้งในแง่ของปริมาณและความคุ้มค่า การย่อยสลายกากมันสำปะหลังในช่วง pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอแก๊ส เมื่อมีการเติมเหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้น 60 g/kg TVS

4.2.3.2 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ

ทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Statistical hypothesis) การใช้โปรแกรมประยุกต์ทางสถิติ SPSS for Windows ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้น ภายหลังการหมัก 60 วัน และทำการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparison) เพื่อหาข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งจะต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ (Post hoc test) โดยใช้วิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) เขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

สมมติฐานทางสถิติ : $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$
 $H_1 :$ อย่างน้อยเฉลี่ย 2 ค่า หรือ 1 คู่ แตกต่างกัน

เมื่อกำหนดให้

H_0 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05
 H_1 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ที่นัยสำคัญ 0.05
 μ คือ ค่าเฉลี่ยไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละ Condition

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant
Between Groups	154299638.856	10	15429963.886	16165.469	0.000
Within Groups	314985.484	330	954.501		
Total	154614624.340	340			

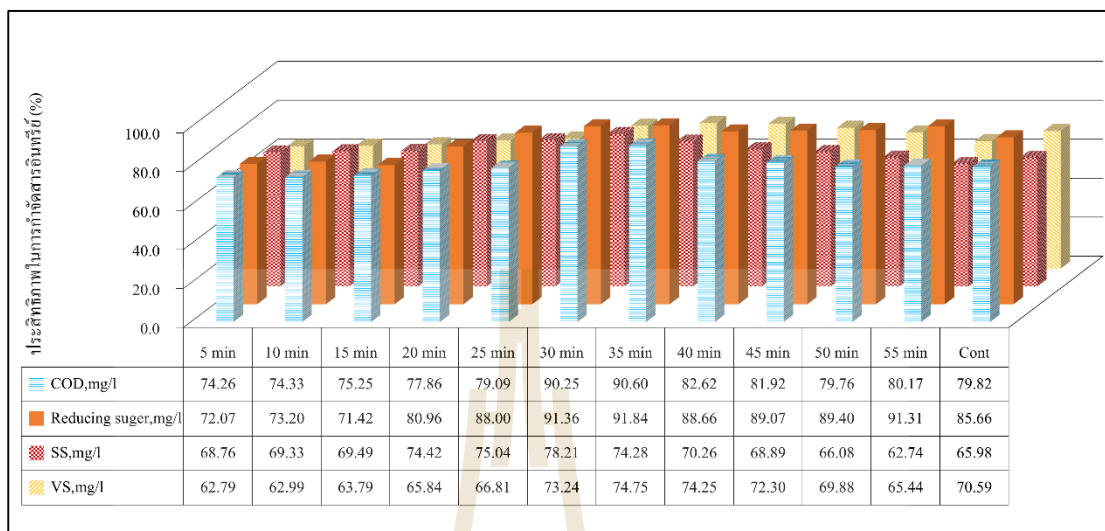
จากตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติ พบว่า มีค่า Significant = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 และยอมรับ H_1 คือ อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่เหล็กประจุศูนย์ ความเข้มข้นต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน อย่างน้อย 1 คู่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน จึงมีการทดสอบ Post hoc test โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) เพื่อหาว่าคู่ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

(I) Time	(J) Time	Significant	(I) Time	(J) Time	Significant	(I) Time	(J) Time	Significant
30 min	5 min	0.000	35 min	5 min	0.000	40 min	5 min	0.000
	10 min	0.000		10 min	0.000		10 min	0.000
	15 min	0.000		15 min	0.000		15 min	0.000
	20 min	0.000		20 min	0.000		20 min	0.000
	25 min	0.000		25 min	0.000		25 min	0.000
	35 min	0.991		30 min	0.991		30 min	0.059
	40 min	0.059		40 min	0.051		35 min	0.051
	45 min	0.000		45 min	0.000		45 min	0.026
	50 min	0.000		50 min	0.000		50 min	0.000
55 min	0.000	55 min	0.000	55 min	0.000			

จากตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่า Significant ของแต่ละกลุ่มตัวอย่างเทียบกันด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะพบว่าที่ เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายกากมันสำปะหลังก่อนการหมักเพื่อผลิตไบโอแก๊ส ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด คือช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที มีค่า Significant = 0.000 หรือ น้อยกว่า 0.05 เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5, 10, 15, 20, 25, 45, 50 และ 55 นาที แสดงว่าปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที แตกต่างจากเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5, 10, 15, 20, 25, 45, 50 และ 55 นาที อย่างมีนัยสำคัญ และจากการศึกษาพบว่า มีค่า Significant มากกว่า 0.05 เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 และ 40 นาที กล่าวคือปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จึงสรุปได้ว่า ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของปริมาณและความคุ้มค่า การย่อยสลายกากมันสำปะหลังในช่วง pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอแก๊ส เมื่อมีการเติมเหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้น 60 g/kg TVS

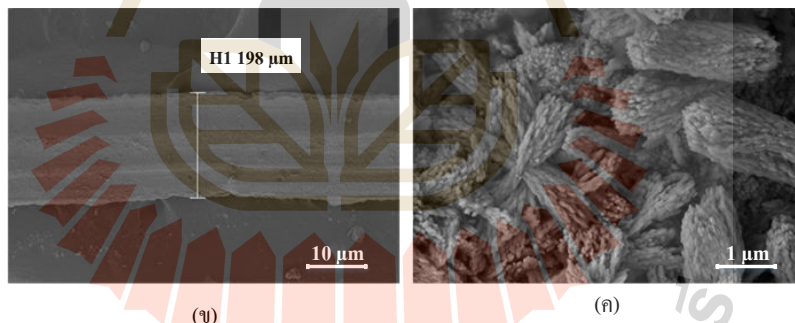
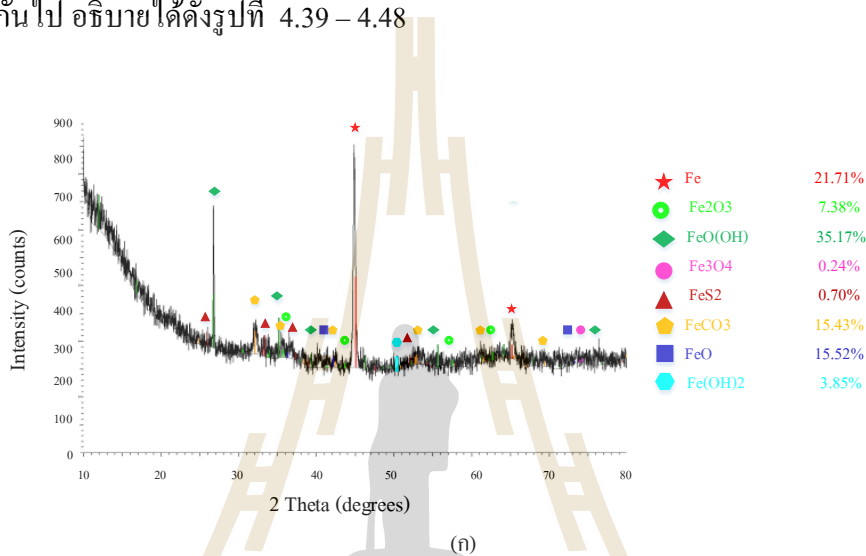


รูปที่ 4.38 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%) ในการศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

จากรูปที่ 4.38 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD อยู่ในช่วง 74.26 - 90.60% น้ำตาลรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 71.42 - 91.84% ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) อยู่ในช่วง 62.74 - 78.21% และของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) อยู่ในช่วง 62.79 - 74.75% โดยที่ ในสภาวะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 35 นาที โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุด

4.2.3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเหล็กประจุศูนย์ จากการศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส ภายหลังจากหมักที่เวลา 60 วัน

ออกไซด์ของเหล็กประจุศูนย์ภายหลังจากให้อิเล็กตรอนในการเพิ่มการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน มีลักษณะของออกไซด์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไป อธิบายได้ดังรูปที่ 4.39 – 4.48



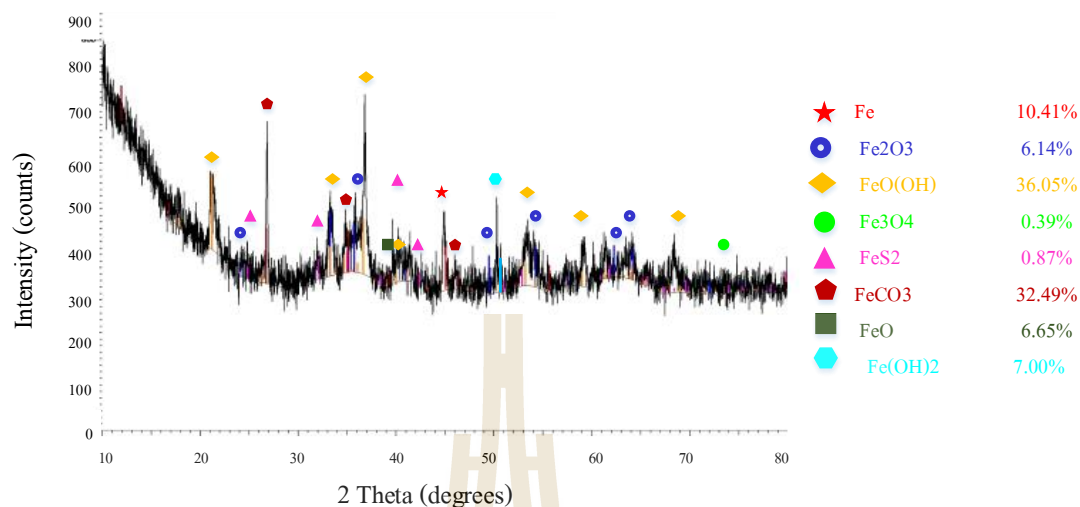
รูปที่ 4.39 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	21.71%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	7.38%
FeOOH (Fe ³⁺)	35.17%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.24%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.70%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	15.43%
FeO (Fe ²⁺)	15.52%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	3.85%

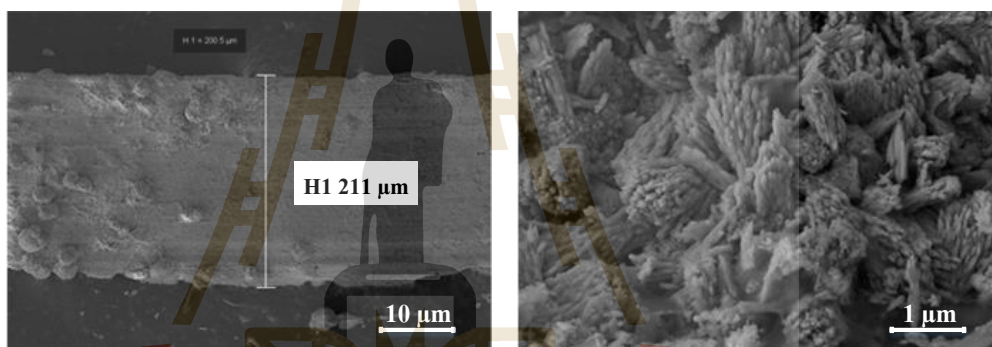
จากรูปที่ 4.39 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 42.22% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 34.80% มีปริมาณเหล็กประจุศูนย์เหลือมากถึง 21.71% นั้นหมายถึงกากมันสำปะหลังสำหรับที่ถูกลดด้วยเวลา 5 นาที ยังไม่ถูกเปลี่ยนไปเป็น VFA หรือยังเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ เหล็กประจุศูนย์จึงไม่สามารถออกซิไดส์ VFA ในรูปของ Propionate และ Butyrate ให้อยู่ในรูปของ Acetate ซึ่งจะเป็ตัวหลักที่ทำให้เกิด CH₄ ขึ้นในระบบ แสดงสมการการเกิด Acetate ได้ดังสมการที่ (4-117)–(4-118)



ลักษณะสัณฐานวิทยาของเหล็กมีลักษณะเป็นหลอดขนาดเล็กเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ เนื่องจากออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน (Glasauer et al., 2001)



(ก)



(ข)

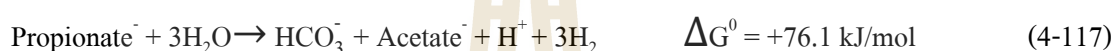
(ค)

รูปที่ 4.40 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ขึ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

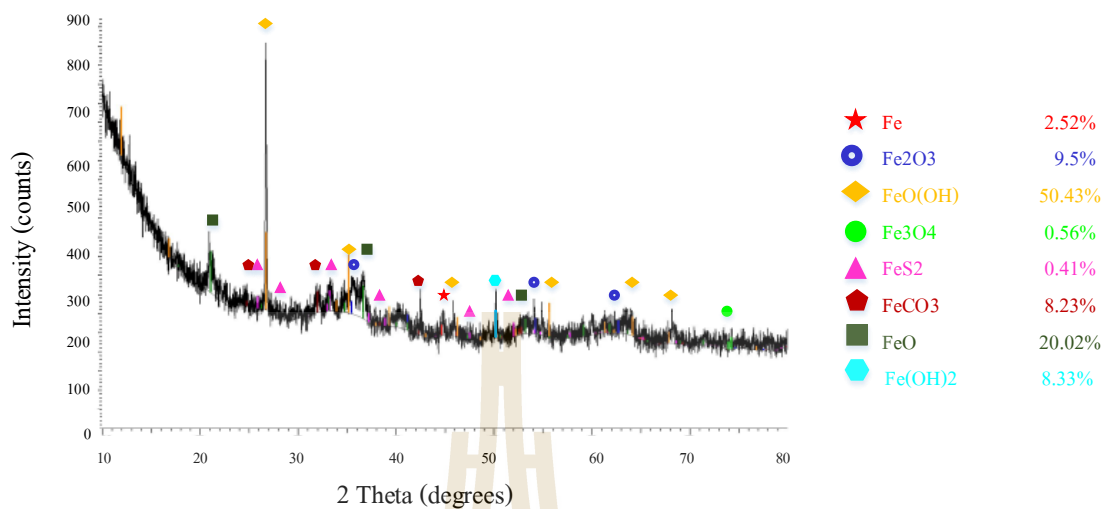
Fe	10.41%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	6.14%
FeOOH (Fe ³⁺)	36.05%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.39%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.87%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	32.49%
FeO (Fe ²⁺)	6.65%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	7.00%

จากรูปที่ 4.40 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

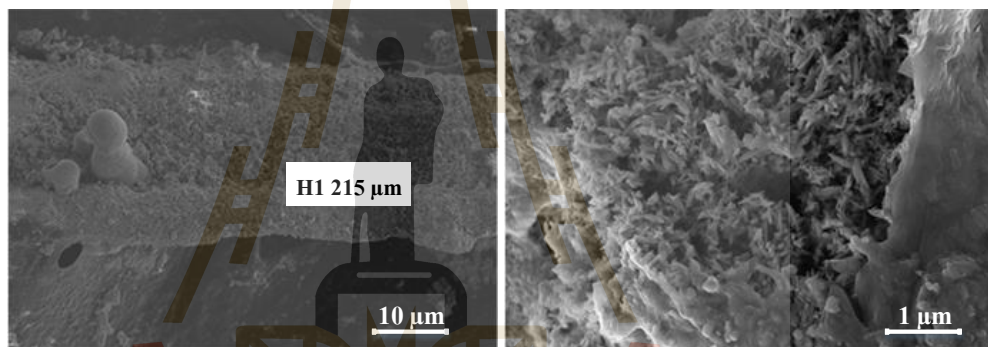
ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 43.06% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 46.14% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 34.80% มีปริมาณเหล็กประจุศูนย์เหลือมากถึง 10.41% นั้นหมายถึงกากมันสำปะหลังสำหะหลังที่ถูกย่อยด้วยเวลา 10 นาที ยังไม่ถูกเปลี่ยนไปเป็น VFA หรือยังเป็น โมเลกุลขนาดใหญ่ เหล็กประจุศูนย์จึงไม่สามารถออกซิไดส์ VFA ในรูปของ Propionate และ Butyrate ให้อยู่ในรูปของ Acetate ซึ่งจะเป็นตัวหลักที่ทำให้เกิด CH_4 ขึ้นในระบบ แสดงสมการการเกิด Acetate ได้ดังสมการที่ (4-117) – (4-118)



ลักษณะพื้นฐานวิทยาของเหล็กมีลักษณะคล้ายกับการทำปฏิกิริยาที่ 5 นาที คือมีลักษณะเป็นหลอดขนาดเล็กรียงต่อกันเป็นชั้นๆ เนื่องจากออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน (Glasauer et al., 2001)



(ก)



(ข)

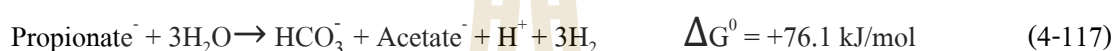
(ค)

รูปที่ 4.41 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	2.52%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	9.50%
FeOOH (Fe ³⁺)	50.43%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.56%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.41%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	8.23%
FeO (Fe ²⁺)	20.02%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	8.33%

จากรูปที่ 4.41 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 60.34% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 36.58% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 2.52% นั้นหมายถึงกากมันสำปะหลังสำหรับหาลูกเหล็กที่ถูกลบด้วยเวลา 15 นาที ยังเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่เหล็กประจุศูนย์ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์สามารถเพิ่มความสามารถในการออกซิไดส์ VFA ในรูปของ Propionate และ Butyrate ให้อยู่ในรูปของ Acetate ซึ่งจะเป็นตัวหลักที่ทำให้เกิด CH₄ ขึ้นในระบบ เท่านั้น แสดงสมการการเกิด Acetate ได้ดังสมการที่ (4-117) – (4-118)



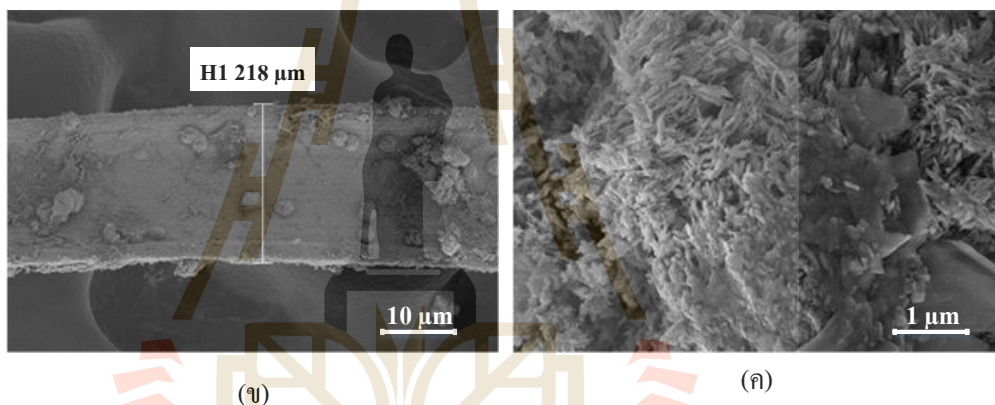
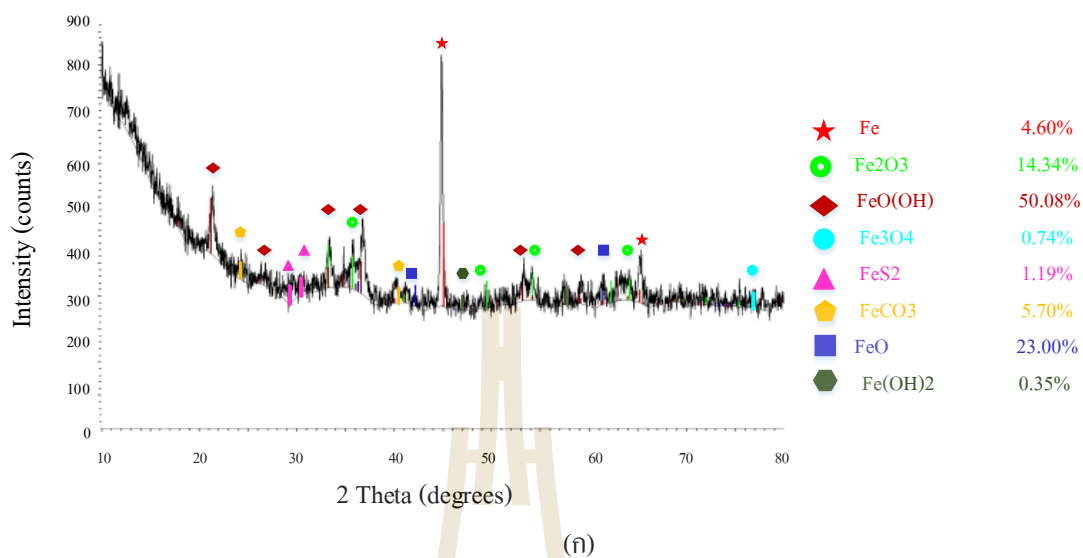
โดยที่หน้าที่หลักของเหล็กประจุศูนย์คือการให้อิเล็กตรอนดังสมการ (4-119)



และสมการหลักในการผลิตไบโอแก๊สได้จากการใช้ H⁺/CO₂ ดังสมการ (4-120)



ลักษณะพื้นฐานวิทยาของเหล็กที่เวลาเพิ่มขึ้นมีลักษณะเปลี่ยนจากหลอดขนาดเล็กเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ มาเป็น nanoplates ขนาดใหญ่ (Li et al., 2016)



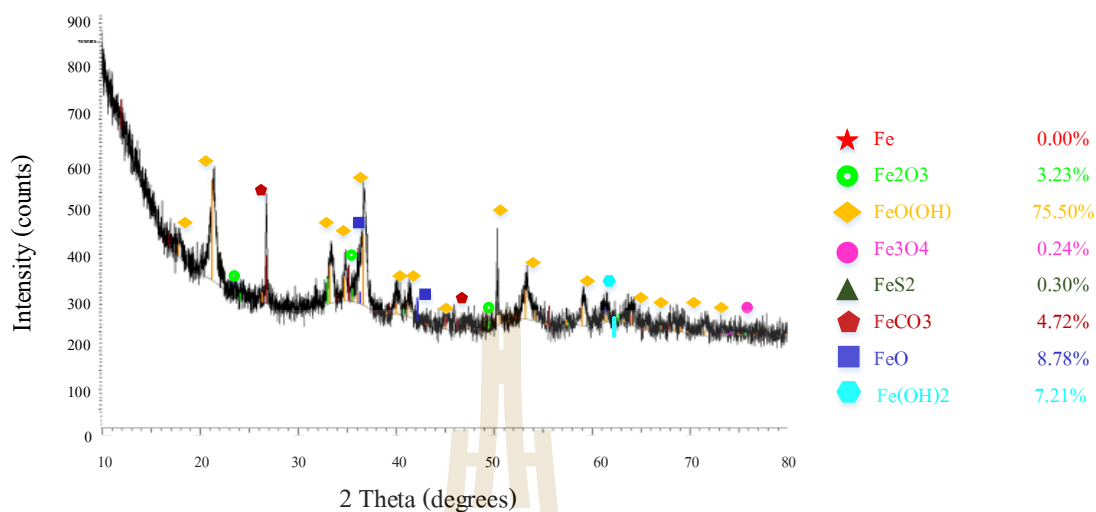
รูปที่ 4.42 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	4.60%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	14.34%
FeOOH (Fe ³⁺)	50.08%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.74%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	1.19%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	5.70%
FeO (Fe ²⁺)	23.00%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	0.35%

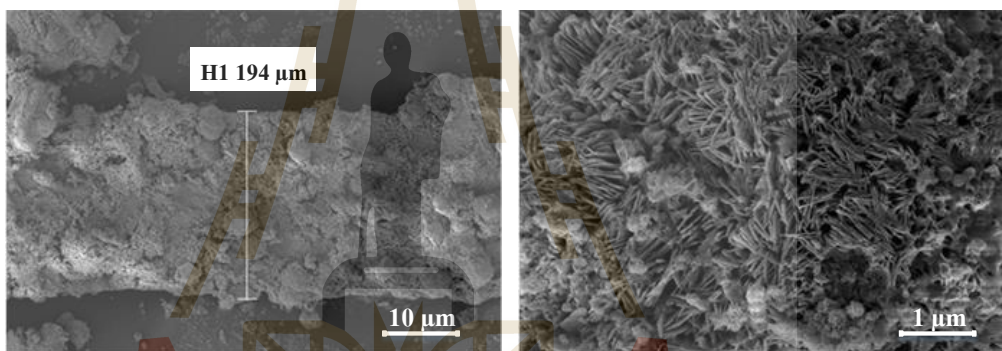
จากรูปที่ 4.42 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสจากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำ

ปฏิกิริยา 20 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 65.61% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 29.05% ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหลืออยู่คือ 4.60% ส่วนประกอบออกไซด์อื่นๆ ลักษณะคล้ายกับ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที รวมทั้งลักษณะสัณฐานวิทยาของเหล็กที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ยังมีลักษณะเป็น nanoplates ขนาดใหญ่ (Li et al., 2016) การใช้เหล็กประจุศูนย์ในการให้อิเล็กตรอนแก่ VFA ยังเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังสำปะหลัง ยังไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงหรือเซลล์โลสให้กลายเป็น VFA ได้อย่างสมบูรณ์ เหล็กประจุศูนย์ จึงไม่สามารถให้อิเล็กตรอนแก่ VFA เพื่อเปลี่ยนจาก Propionate และ Butyrate ให้อยู่ในรูปของ Acetate ซึ่งจะเป็นตัวหลักที่ทำให้เกิด CH_4 ขึ้นในระบบ ได้อย่างสมบูรณ์ แสดงสมการการเกิด Acetate ส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ต่ำ เมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยาที่ 30, 35 และ 40 นาที





(ก)



(ข)

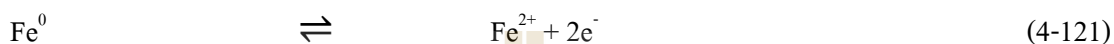
(ค)

รูปที่ 4.43 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	0.00%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	3.23%
FeOOH (Fe ³⁺)	75.50%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.24%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.30%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	4.72%
FeO (Fe ²⁺)	8.78%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	7.21%

จากรูปที่ 4.43 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

ภายหลังการไฮโดรไลซิสจากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe³⁺ ประมาณ 79.03% และอยู่ในรูปของ Fe²⁺ ประมาณ 20.71% อะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดซ์ไปเป็น Fe²⁺ ดังสมการที่ (4-121)

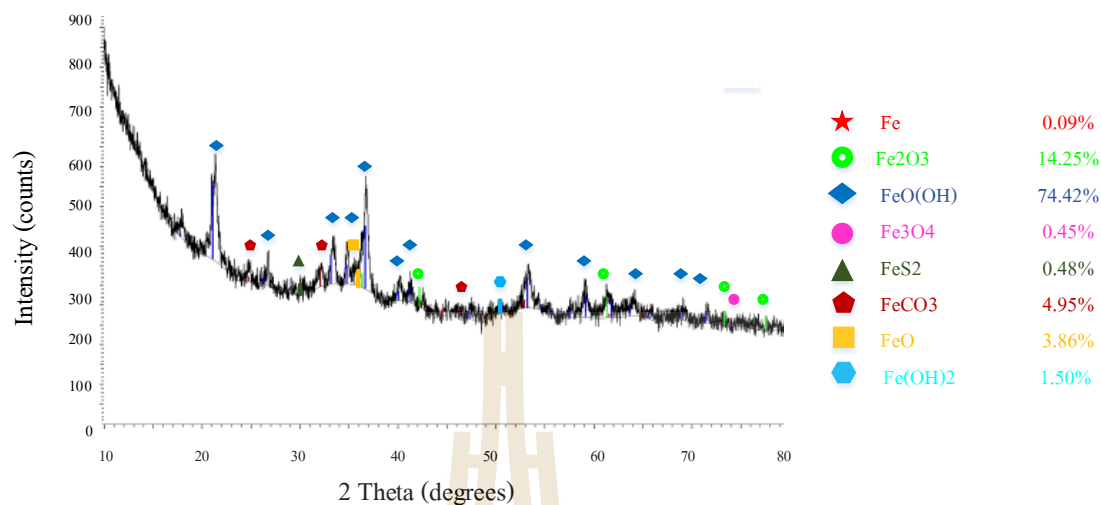


จากผล XRD พบว่าออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe³⁺) ซึ่งแสดงสมการการเกิด FeOOH ดังสมการที่ (4-122) – (4-124)

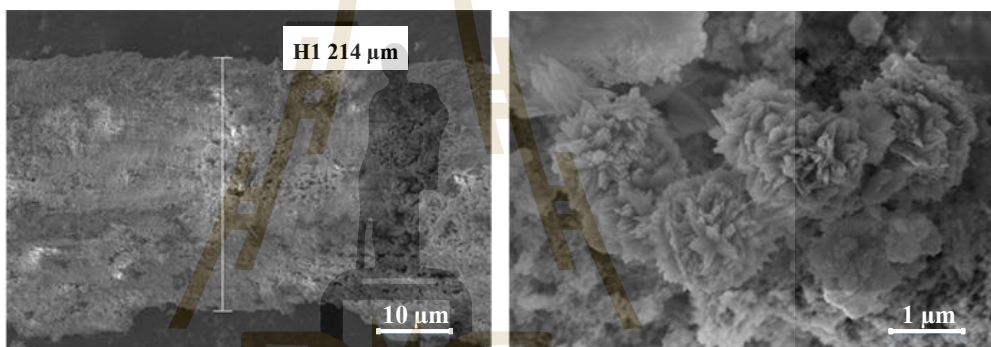


จากสมการดังกล่าวจะพบว่า เมื่อ Fe⁰ รวมตัวกับน้ำ เกิดเป็นออกไซด์ FeOOH และยังเกิด H₂ ในระบบอีกด้วย ซึ่ง H₂ เมื่อรวมตัวกับ CO₂ ดังสมการ (4-125) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ CH₄





(ก)



(ข)

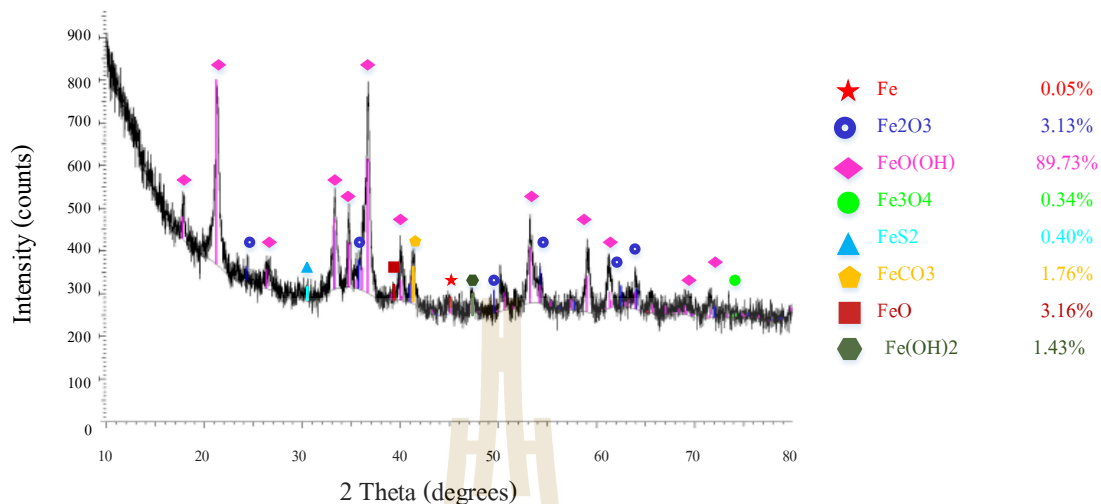
(ค)

รูปที่ 4.44 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

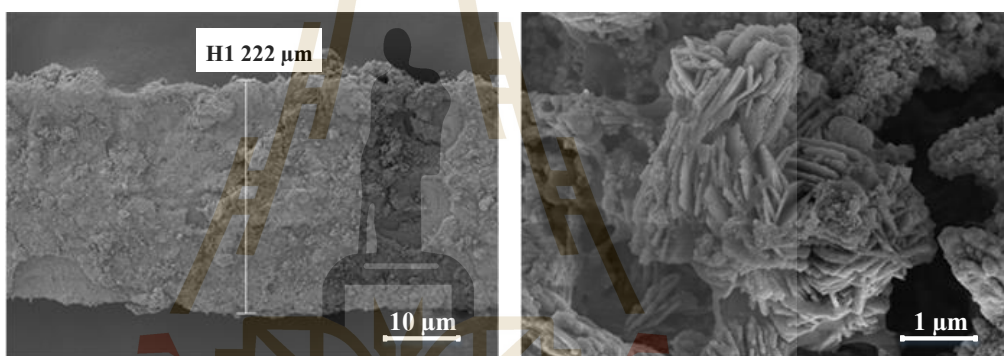
Fe	0.09%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	14.25%
FeOOH (Fe ³⁺)	74.02%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.45%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.48%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	4.95%
FeO (Fe ²⁺)	3.86%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	1.50%

จากรูปที่ 4.44 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 87.75% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 10.31% โดยที่เหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ $\text{FeOOH} (\text{Fe}^{3+})$ ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของเหล็กอีกตัวหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไป ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น มลทินที่ติดอยู่ในบนชิ้นงานเหล็กประจุศูนย์ ก็จะมากขึ้น (Karri et al., 2005) จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานในสภาวะนี้ จึงมีลักษณะเป็นหินย้อยคล้ายกับพื้นผิวของสิ่งประดิษฐ์เหล็ก มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กกระจายหลวมๆ คล้ายกลีบดอกไม้เล็กๆ แต่อาจมีลักษณะสั้นยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการกัดกร่อน (Zise et al., 2007)



(ง)



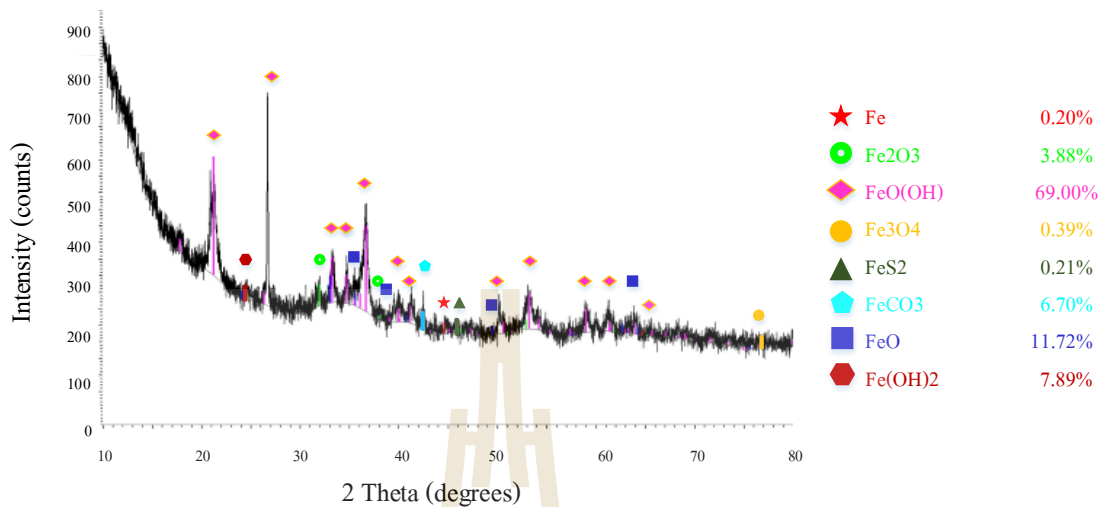
(ข)

(ค)

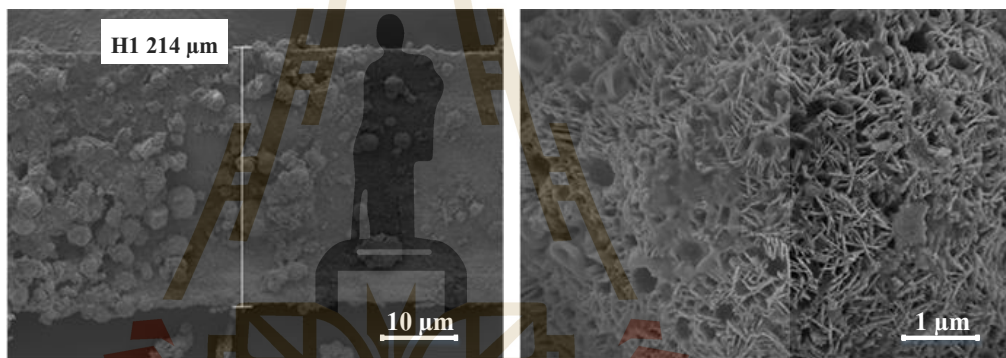
รูปที่ 4.45 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	0.05%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	3.13%
FeOOH (Fe ³⁺)	89.73%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.34%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.40%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	1.76%
FeO (Fe ²⁺)	3.16%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	1.43%

จากรูปที่ 4.45 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 93.26% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 6.35% โดยที่เหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ FeOOH (Fe^{3+}) เช่นเดียวกับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที แต่ในการศึกษาที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที มีเหล็กออกไซด์ในรูปของ FeOOH (Fe^{3+}) สูงกว่า 6% ซึ่งถือได้ว่า FeOOH (Fe^{3+}) เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของเหล็กอีกตัวหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไป ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น มลทินที่ติดอยู่ในบนชิ้นงานเหล็กประจุศูนย์ ก็จะมากขึ้น (Karri et al., 2005) ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่เวลาการทำปฏิกิริยา 35 นาที จึงมีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุด เมื่อเทียบกับการไฮโดรไลซิสที่เวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน ในสภาวะนี้ จึงมีลักษณะเป็นหินย่อยคล้ายกับพื้นผิวของสิ่งประดิษฐ์เหล็ก มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กระจายหลวมๆ คล้ายกลีบดอกไม้เล็กๆ แต่อาจมีลักษณะสั้นยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการกักร่อน (Zise et al., 2007)



(ก)



(ข)

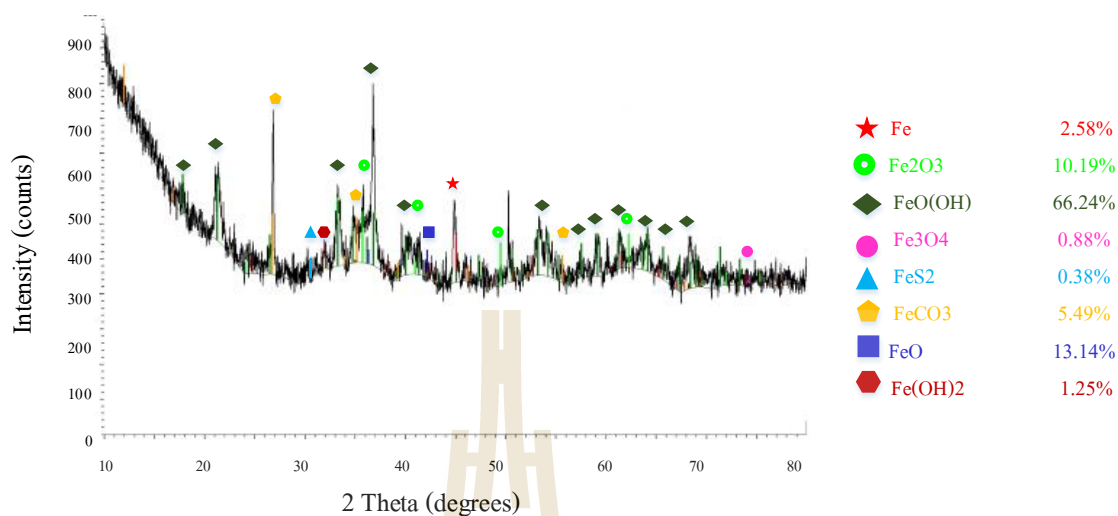
(ค)

รูปที่ 4.46 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

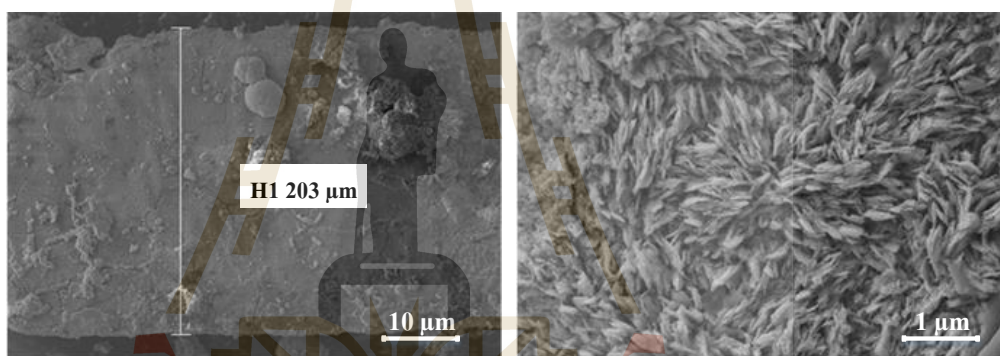
Fe	0.20%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	3.88%
FeOOH (Fe ³⁺)	69.00%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.39%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.21%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	6.70%
FeO (Fe ²⁺)	11.72%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	7.89%

จากรูปที่ 4.46 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 73.27% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 26.31% เหล็กประจุศูนย์ถูกใช้ในการให้อิเล็กตรอนจนหมด เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ $FeOOH (Fe^{3+})$ เป็นส่วนมาก เนื่องจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่เวลา 40 นาที แป้งจะถูกย่อยและเปลี่ยนเป็น VFA มากขึ้น เหล็กประจุศูนย์จึงมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก่ VFA เพื่อเปลี่ยนไปเป็น Acetate ได้มากขึ้น แต่จุลินทรีย์ในการผลิตไบโอแก๊สจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อความเป็นกรด ไม่สูงเกินไป (Zhu et al., 2012)

จากลักษณะพื้นฐานวิทยาจะพบหมือกของจุลินทรีย์ติดอยู่ทั่วทั้งบริเวณออกไซด์ของเหล็ก นั้นบ่งบอกได้ว่าความเป็นกรดที่เวลา 40 นาที สูงจึงเข้าไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำกว่าที่เวลา 30 และ 35 นาที



(ก)



(ข)

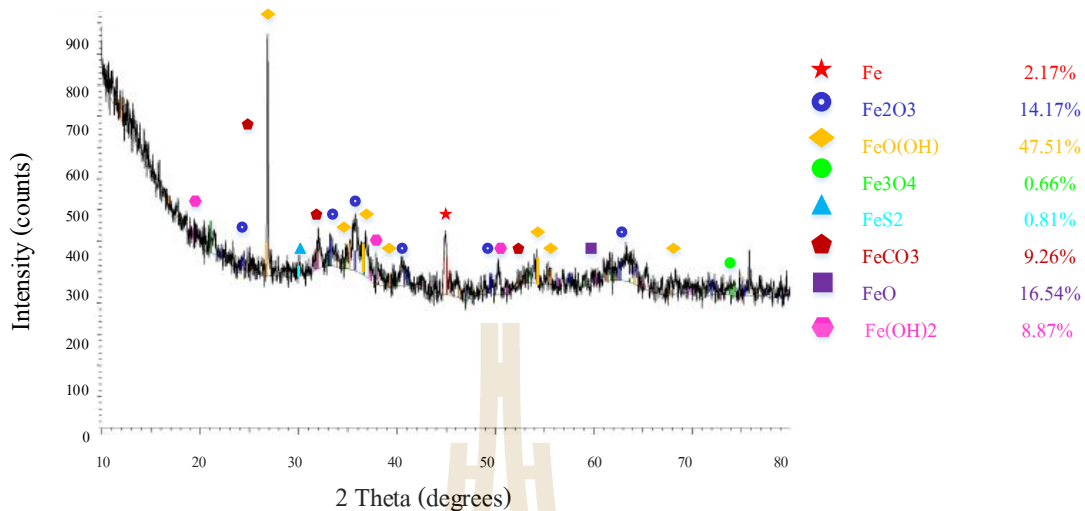
(ค)

รูปที่ 4.47 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

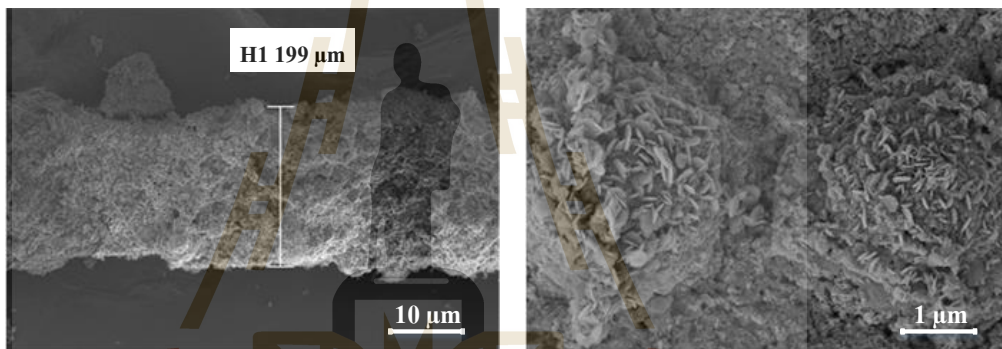
Fe	2.58%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	10.19%
FeOOH (Fe ³⁺)	66.24%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.88%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.38%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	5.49%
FeO (Fe ²⁺)	13.14%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	1.25%

จากรูปที่ 4.47 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 76.81% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 19.88% เหล็กประจุศูนย์ถูกใช้ในการให้อิเล็กตรอน และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ $FeOOH (Fe^{3+})$ เป็นส่วนมาก เนื่องจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่เวลา 45 นาที แป้งจะถูกย่อยและเปลี่ยนเป็น VFA มากขึ้น เหล็กประจุศูนย์จึงมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก่ VFA เพื่อเปลี่ยนไปเป็น Acetate ได้มากขึ้น แต่จุลินทรีย์ในการผลิตไบโอแก๊สจะทำงาน ได้ก็ต่อเมื่อความเป็นกรด ไม่สูงเกินไป (Zhu et al., 2012) เช่นเดียวกับการทำปฏิกิริยา 40 นาที

จากลักษณะสัญญาณวิทยาจะพบหม้ออกของจุลินทรีย์ดีดอยู่ทั่วทั้งบริเวณออกไซด์ของเหล็ก นั้นบ่งบอกได้ว่าความเป็นกรดที่เวลา 45 นาที สูงจึงเข้าไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำกว่าที่เวลา 30 และ 35 นาที



(ก)



(ข)

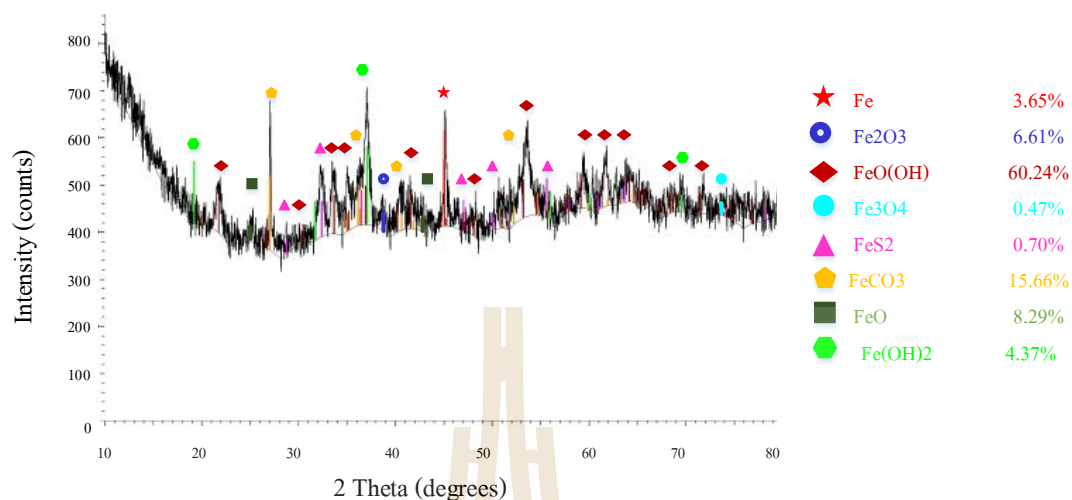
(ค)

รูปที่ 4.48 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

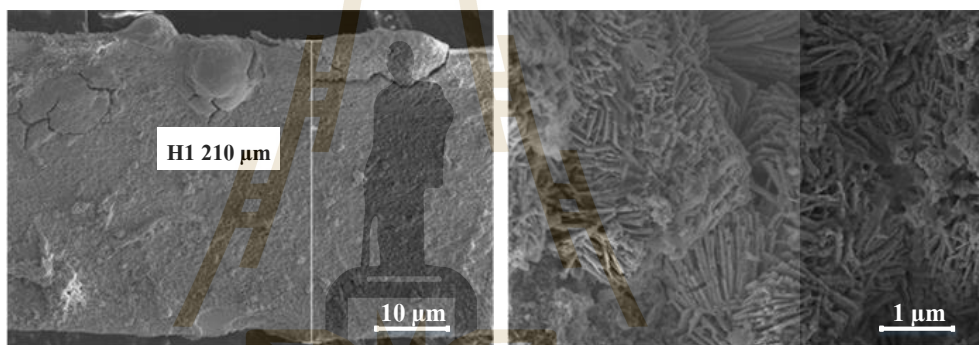
Fe	2.17%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	14.17%
FeOOH (Fe ³⁺)	47.51%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.66%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.81%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	9.26%
FeO (Fe ²⁺)	16.54%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	8.87%

จากรูปที่ 4.48 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 62.49% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 34.67% เหล็กประจุศูนย์ถูกใช้ในการให้อิเล็กตรอน และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ $FeOOH (Fe^{3+})$ เป็นส่วนมาก เนื่องจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่เวลา 50 นาที แป้งจะถูกย่อยและเปลี่ยนเป็น VFA มากขึ้น เหล็กประจุศูนย์จึงมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก่ VFA เพื่อเปลี่ยนไปเป็น Acetate ได้มากขึ้น แต่จุลินทรีย์ในการผลิตไบโอแก๊สจะทำงาน ได้ก็ต่อเมื่อความเป็นกรด ไม่สูงเกินไป (Zhu et al., 2012) เช่นเดียวกับการทำปฏิกิริยา 40 และ 45 นาที

จากลักษณะพื้นฐานวิทยามีลักษณะเป็น nanoflakes คือมีลักษณะเป็นชั้นเล็กๆกระจายอยู่ตามชิ้นงาน เนื่องจากการให้อิเล็กตรอนของเหล็ก (Li et al., 2016) พบหมึกของจุลินทรีย์ติดอยู่ทั่วทั้งบริเวณออกไซด์ของเหล็ก นั้นบ่งบอกได้ว่าความเป็นกรดที่เวลา 50 นาที สูงจึงเข้าไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำกว่าที่เวลา 30, 35, 40 และ 45 นาที



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.49 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน ใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 55 นาที ผลจากการศึกษา XRD pattern ด้วยโปรแกรม TOPAS ชิ้นงานที่ศึกษาประกอบไปด้วย เหล็กออกไซด์ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

Fe	3.65%	Fe ₂ O ₃ (Fe ³⁺)	6.61%
FeOOH (Fe ³⁺)	60.24%	Fe ₃ O ₄ (Fe ²⁺ และ Fe ³⁺)	0.47%
FeS ₂ (Fe ³⁺)	0.70%	FeCO ₃ (Fe ²⁺)	15.66%
FeO (Fe ²⁺)	8.29%	Fe(OH) ₂ (Fe ²⁺)	4.37%

จากรูปที่ 4.49 XRD pattern ของเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่เวลา 60 วัน โดยใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วย pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 55 นาที พบว่าเหล็กประจุศูนย์ส่วนมาก ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ ในรูปของ Fe^{3+} ประมาณ 67.55% และอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ประมาณ 28.32% เหล็กประจุศูนย์ถูกใช้ในการให้อิเล็กตรอน และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ $FeOOH (Fe^{3+})$ เป็นส่วนมาก เนื่องจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่เวลา 55 นาที แป้งจะถูกย่อยและเปลี่ยนเป็น VFA มากขึ้น เหล็กประจุศูนย์จึงมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก่ VFA เพื่อเปลี่ยนไปเป็น Acetate ได้มากขึ้น แต่จุลินทรีย์ในการผลิตไบโอแก๊สจะทำงาน ได้ก็ต่อเมื่อความเป็นกรด ไม่สูงเกินไป (Zhu et al., 2012) เช่นเดียวกับการทำปฏิกิริยา 40, 45 และ 50 นาที

จากลักษณะสัณฐานวิทยามีลักษณะเป็น แผ่นเล็กๆเรียงซ้อนกัน พร้อมขึ้นรูปเป็นผลึกชั้นใหญ่กระจายอยู่ตามชิ้นงาน เนื่องจากการให้อิเล็กตรอนของเหล็ก (Li et al., 2016) นอกจากนี้ยังพบหม้ออกของจุลินทรีย์ติดอยู่ทั่วทั้งบริเวณออกไซด์ของเหล็ก นั้นบ่งบอกได้ว่าความเป็นกรดที่เวลา 55 นาที สูงจึงเข้าไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สต่ำกว่าที่เวลา 30, 35, 40, 45 และ 50 นาที

4.3 ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบชุดข้อมูลทั้ง 3 ชุดการทดลอง

4.3.1 การเปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในสถานะควบคุม

โดยใช้การทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS ด้วยวิธี One-way-ANOVA เพื่อทดสอบว่าการศึกษาทั้ง 4 ชุดการทดลองในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน มีปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

สถานะที่ 1 ชุดควบคุมจากการทดลองที่ 4.1 จากการศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส

สถานะที่ 2 ชุดควบคุมจากการทดลองที่ 4.2.1 จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้หลักประจุศูนย์ 100 g/kg TVS

สถานะที่ 3 ชุดควบคุมจากการทดลองที่ 4.2.2 จากการศึกษาปริมาณหลักประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

สถานะที่ 4 ชุดควบคุมจากการทดลองที่ 4.2.3 จากการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

สมมติฐานทางสถิติ : $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$
 $H_1 : \text{อย่างน้อยเฉลี่ย 2 ค่า หรือ 1 คู่ แตกต่างกัน}$

เมื่อ

H_0 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05

H_1 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ที่นัยสำคัญ 0.05

μ คือ ค่าเฉลี่ยของไบโอแก๊สในสถานะที่ควบคุม (ชุด Control)

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของปริมาณไบโอแก๊สที่สถานะควบคุมทั้ง 4 สถานะที่ทำการทดลอง โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant
Between Groups	2472.323	3	824.108	0.153	0.928
Within Groups	1057007.597	196	5392.896		
Total	1059479.920	199			

จากตารางที่ 4.13 เมื่อนำปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นจากสภาวะที่ควบคุม (ชุด Control) ชุดที่ 1 จากการศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส ชุดที่ 2 จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS ชุดที่ 3 จากการศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส และชุดที่ 4 จากการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติ พบว่า มีค่า Significant = 0.928 ซึ่งมากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าการศึกษานี้ ยอมรับ H_0 คือ อัตราการผลิตไบโอแก๊สที่สภาวะควบคุมทั้ง 4 สภาวะที่ทำการศึกษาไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสรุปได้ว่าชุดควบคุมทั้ง 4 ชุด เป็นชุดควบคุมชุดเดียวกัน

4.3.2 การเปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS

โดยใช้การทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS ด้วยวิธี Paired-Sample T Test ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบความเหมือนกันของชุดข้อมูลทั้ง 2 ชุดการทดลองที่ทำการทดลองในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

สภาวะที่ 1 ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 4.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS

สภาวะที่ 2 ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 4.2.2 ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

สมมติฐาน H_0 : $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$

เมื่อ

H_0 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05

H_1 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05

μ คือ ค่าเฉลี่ยของไบโอแก๊สแต่ละกลุ่มการศึกษา

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณ ไบโอดีที่เพิ่มขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.1 และการทดลองที่ 4.2.2

การศึกษา	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า t	Significant
pH10_100g	41	1936.8293	250.89030	- 0.779	0.221
pH10_VaryZVI	41	1943.1707	269.83503		

ที่ $\alpha = 0.05$

$$t_{cr} = t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}$$

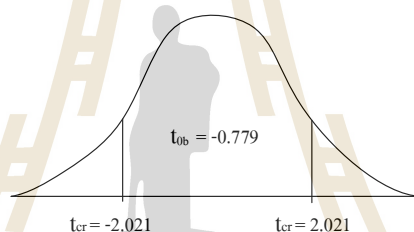
$$t_{cr} = t_{40, 0.025}$$

$$t_{cr} = 2.021 \text{ (Appendix-statistical Table)}$$

ปฏิเสธ H_0

ยอมรับ H_0

ปฏิเสธ H_0



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม SPSS และขอบเขตที่ยอมรับได้ (t_{cr}) ที่ได้จากตาราง Appendix-statistical ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.50 ผลการทดสอบสมมติฐานด้วย Paired-Sample T Test เมื่อนำปริมาณไบโอดีที่เพิ่มขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.1 และ ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.2 จะเห็นว่า ค่า t ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม SPSS คือ - 0.779 ซึ่งอยู่ในช่วง [- 2.021 , 2.021] และค่า Significant = 0.221 มากกว่า 0.05 ดังนั้นการทดสอบนี้ยอมรับ H_0 คือ $\mu_1 = \mu_2$ หมายถึง ความแตกต่างของปริมาณไบโอดีในการทดลองที่ 4.2.1 และการทดลองที่ 4.2.2 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเชื่อมั่น 95% จึงสรุปได้ว่า ปริมาณไบโอดีที่เพิ่มขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.1 และที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 100 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.2 เป็นข้อมูลชุดเดียวกัน

4.3.3 การเปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

โดยใช้การทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS ด้วยวิธี Paired-Sample T Test ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบความเหมือนกันของชุดข้อมูลทั้ง 2 ชุดการทดลองที่ทำการทดลองในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

สถานะที่ 1 ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 4.2.2 ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

สถานะที่ 2 ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 4.2.3 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

สมมติฐาน H_0 : $\mu_1 = \mu_2$
 H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$

เมื่อ

H_0 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05

H_1 คือ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกัน ที่นัยสำคัญ 0.05

μ คือ ค่าเฉลี่ยของไบโอแก๊สแต่ละกลุ่มการศึกษา

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบชุดข้อมูลปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.2 และการทดลองที่ 4.2.3

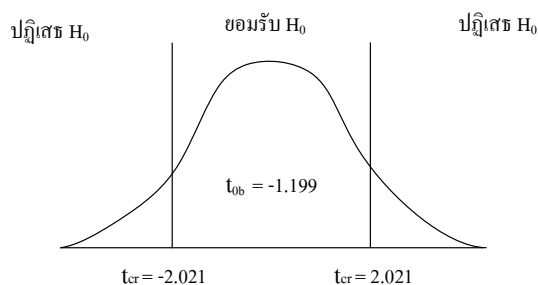
การศึกษา	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	t_{observ}	Significant
TestZVI_60g30min	41	2522.8049	98.08191	-1.199	0.238
TestTime_60g30min	41	2536.9512	33.78014		

ที่ $\alpha = 0.05$

$$t_{\text{cr}} = t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}$$

$$t_{\text{cr}} = t_{40, 0.025}$$

$$t_{\text{cr}} = 2.021 \text{ (Appendix-statistical Table)}$$



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม SPSS และขอบเขตที่ยอมรับได้ (t_{cr}) ที่ได้จากตารางเปิดตาราง Appendix-statistical ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.51 ผลการทดสอบสมมติฐานด้วย Paired-Sample T Test เมื่อนำปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.2 และ ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.3 จะเห็นว่า ค่า t ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม SPSS คือ - 1.199 ซึ่งอยู่ในช่วง [-2.021 , 2.021] และค่า Significant = 0.238 มากกว่า 0.05 ดังนั้นการทดสอบนี้ยอมรับ H_0 คือ $\mu_1 = \mu_2$ หมายถึง ความแตกต่างของปริมาณไบโอแก๊สในการทดลองที่ 4.2.2 และการทดลองที่ 4.2.3 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเชื่อมั่น 95% จึงสรุปได้ว่า ปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.2 และ ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS ในการทดลองที่ 4.2.3 เป็นข้อมูลชุดเดียวกัน

4.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง

สารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสด้วยกรดคือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 98% ซึ่งใช้แบบ AR grade ของบริษัท ไตรเอ็นชาयน์ โพรไวด์เดอร์ จำกัด ราคา 435 บาทต่อกรด 2.5 L สารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสด้วยเบส คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) ซึ่งใช้แบบ AR grade ของบริษัท ไตรเอ็นชาयน์ โพรไวด์เดอร์ จำกัด ราคา 340 บาทต่อกิโลกรัม และสารเคมีที่ใช้ในการปรับ pH เป็นกลางคือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ซึ่งใช้แบบ AR grade ของบริษัท ไตรเอ็นชาयน์ โพรไวด์เดอร์ จำกัด ราคา 370 บาทต่อ 500 g สำหรับราคาเป็นราคาในช่วงเดือน สิงหาคม พ.ศ 2558 ซึ่งเป็นราคาขายปลีก ในกรณีของการเดินระบบจริง ต้องมีการใช้สารเคมีในปริมาณมากขึ้น อาจเสีย

ค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมีได้ราคาถูกกว่ามากกว่าครึ่ง เนื่องจากซื้อได้ในราคาส่ง การประเมินค่าใช้จ่ายในส่วนของสารเคมีที่ใช้สำหรับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังและความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการเดินระบบจริง แสดงไว้ในตารางที่ 4.16 ถึง ตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.16 ปริมาณสารเคมีที่เตรียมเพื่อใช้ในการปรับพีเอชในกระบวนการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง

สถานะ	สารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส				สารเคมีที่ใช้ในการปรับ pH ให้เป็นกลาง			
	H ₂ SO ₄		NaOH		H ₂ SO ₄		Na ₂ CO ₃	
	ความเข้มข้น	ปริมาตรที่ใช้	ความเข้มข้น	น้ำหนักที่ใช้	ความเข้มข้น	ปริมาตรที่ใช้	ความเข้มข้น	น้ำหนักที่ใช้
	(N)	(ml/l)	(N)	(g/l)	(N)	(ml/l)	(N)	(g/l)
pH 1	5	135.87	-	-	-	-	5	265.00
pH 2	1	27.17	-	-	-	-	0.5	26.50
pH 3	1	27.17	-	-	-	-	0.5	26.50
pH 4	1	27.17	-	-	-	-	0.5	26.50
pH 5	-	-	1	40.00	-	-	0.5	26.50
pH 6	-	-	1	40.00	-	-	0.5	26.50
pH 7	-	-	1	40.00	-	-	0.5	26.50
pH 8	-	-	1	40.00	1	27.17	-	-
pH 9	-	-	1	40.00	1	27.17	-	-
pH 10	-	-	1	40.00	1	27.17	-	-
pH 11	-	-	1	40.00	1	27.17	-	-
pH 12	-	-	1	40.00	1	27.17	-	-
pH 13	-	-	5	200.00	5	135.87	-	-
Control (pH 4.23)	-	-	-	-	-	-	0.5	26.50

ตารางที่ 4.17 ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลองสำหรับช่วง pH 1-13 ที่ pH เริ่มต้น 4.23

สภาวะ	Temp.	Time	สารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส						สารเคมีที่ใช้ในการปรับ pH ให้เป็นกลาง						กรด H ₂ SO ₄		NaOH		Na ₂ CO ₃		รวม ค่าใช้จ่าย
			H ₂ SO ₄			NaOH			H ₂ SO ₄			Na ₂ CO ₃									
	(°C)	(นาที)	ความเข้มข้น (N)	ปริมาตรที่ใช้ (ml)	ปริมาตรที่ใช้จริง (ml)	ความเข้มข้น (N)	ปริมาตรที่ใช้ (ml)	น้ำหนักที่ใช้จริง (g)	ความเข้มข้น (N)	ปริมาตรที่ใช้ (ml)	ปริมาตรที่ใช้จริง (ml)	ความเข้มข้น (N)	ปริมาตรที่ใช้ (ml)	น้ำหนักที่ใช้จริง (g)	ml/kg TVS	บาท/kg TVS	g/kg TVS	บาท/kg TVS	g/kg TVS	บาท/kg TVS	บาท/kg TVS
pH 1	100	30	5	82.30	11.18	-	-	-	-	-	-	5	78.00	20.67	592.40	103.08	0.00	0.00	1094.81	810.16	913.24
pH 2	100	30	1	50.00	1.36	-	-	-	-	-	-	0.5	27.40	0.73	71.90	12.51	0.00	0.00	38.46	28.46	40.97
pH 3	100	30	1	21.60	0.59	-	-	-	-	-	-	0.5	14.50	0.38	31.06	5.40	0.00	0.00	20.35	15.06	20.47
pH 4	100	30	1	6.40	0.17	-	-	-	-	-	-	0.5	8.00	0.21	9.20	1.60	0.00	0.00	11.23	8.31	9.91
pH 5	100	30	-	-	-	1	9.50	0.38	-	-	-	0.5	2.70	0.07	0.00	0.00	20.13	6.84	3.79	2.80	9.65
pH 6	100	30	-	-	-	1	17.50	0.70	-	-	-	0.5	1.30	0.03	0.00	0.00	37.08	12.61	1.82	1.35	13.96
pH 7	100	30	-	-	-	1	27.20	1.09	-	-	-	0.5	0.30	0.01	0.00	0.00	57.63	19.59	0.42	0.31	19.90
pH 8	100	30	-	-	-	1	9.00	0.36	1	1.20	0.03	-	-	-	1.73	0.30	19.07	6.48	0.00	0.00	6.78
pH 9	100	30	-	-	-	1	13.70	0.55	1	3.20	0.09	-	-	-	4.60	0.80	29.03	9.87	0.00	0.00	10.67
pH 10	100	30	-	-	-	1	15.60	0.62	1	4.20	0.11	-	-	-	6.04	1.05	33.05	11.24	0.00	0.00	12.29
pH 11	100	30	-	-	-	1	18.00	0.72	1	4.90	0.13	-	-	-	7.05	1.23	38.14	12.97	0.00	0.00	14.19
pH 12	100	30	-	-	-	1	24.30	0.97	1	12.80	0.35	-	-	-	18.41	3.20	51.48	17.50	0.00	0.00	20.71
pH 13	100	30	-	-	-	5	93.30	18.66	5	14.20	1.93	-	-	-	102.21	17.79	988.35	336.04	0.00	0.00	353.82
Control	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	27.60	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	38.74	28.67	28.67

ตารางที่ 4.18 ค่าสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ในการศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย ที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของ แก๊สหุงต้ม (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ต่อ กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาหมัก 60 วัน

สภาวะ	Temp. (°C)	Time (นาที)	ค่าสารเคมี (บาท/kg TVS)	ปริมาณแก๊ส (m ³ /kg TVS)	ทดแทนแก๊สหุงต้ม			ทดแทนพลังงานไฟฟ้า		
					ทดแทนแก๊สหุงต้ม (kg LPG/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่ายเพิ่มจากสถานะควบคุม	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (kW/hr)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่ายเพิ่มจากสถานะควบคุม
pH 1	100	30	913.24	0.37	0.17	3.15	-3.28	0.45	1.02	-1.06
pH 2	100	30	40.97	0.42	0.19	3.55	-2.88	0.51	1.15	-0.93
pH 3	100	30	20.47	0.49	0.23	4.14	-2.29	0.59	1.34	-0.74
pH 4	100	30	9.91	0.71	0.33	6.00	-0.43	0.85	1.94	-0.14
pH 5	100	30	9.65	0.75	0.35	6.31	-0.12	0.90	2.04	-0.04
pH 6	100	30	13.96	0.88	0.41	7.45	+1.02	1.06	2.41	+0.33
pH 7	100	30	19.90	0.98	0.45	8.25	+1.82	1.18	2.67	+0.59
pH 8	100	30	6.78	1.05	0.48	8.87	+2.44	1.26	2.87	+0.79
pH 9	100	30	10.67	1.42	0.66	11.99	+5.56	1.71	3.88	+1.80
pH 10	100	30	12.29	2.12	0.97	17.81	+11.38	2.54	5.76	+3.68
pH 11	100	30	14.19	1.44	0.66	12.10	+5.67	1.73	3.92	+1.84
pH 12	100	30	20.71	1.23	0.57	10.34	+3.91	1.47	3.35	+1.27
pH 13	100	30	353.82	0.58	0.27	4.92	-1.51	0.70	1.59	-0.49
Control	28	-	28.67	0.76	0.35	6.43	6.43	0.92	2.08	2.08

ตารางที่ 4.19 ค่าสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุ
 ศูนย์ 100 g/kg TVS เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของ แก๊สหุงต้ม (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ต่อ กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS
 ระยะเวลาหมัก 60 วัน

สภาวะ	Temp. (°C)	Time (นาท)	Fe ⁰ (g/kg TVS)	ค่าสารเคมี (บาท/Kg TVS)	ปริมาณแก๊ส (m ³ /kg TVS)	ทดแทนแก๊สหุงต้ม			ทดแทนพลังงานไฟฟ้า		
						ทดแทนแก๊สหุงต้ม (kg LPG/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่าย เพิ่มจากสภาวะ ควบคุม	ทดแทนพลังงาน ไฟฟ้า (kW/hr)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/kg TVS)	ทดแทน ค่าใช้จ่ายเพิ่ม จากสภาวะ ควบคุม
pH 1	100	30	100	913.24	0.91	0.42	7.64	+1.13	1.09	2.47	+0.36
pH 2	100	30	100	40.97	1.00	0.46	8.42	+1.91	1.20	2.73	+0.62
pH 3	100	30	100	20.47	1.22	0.56	10.29	+3.78	1.47	3.33	+1.22
pH 4	100	30	100	9.91	1.86	0.85	15.63	+9.12	2.23	5.06	+2.95
pH 5	100	30	100	9.65	1.97	0.91	16.58	+10.07	2.36	5.36	+3.25
pH 6	100	30	100	13.96	2.13	0.98	17.89	+11.38	2.55	5.79	+3.68
pH 7	100	30	100	19.90	2.24	1.03	18.85	+12.34	2.69	6.10	+3.99
pH 8	100	30	100	6.78	2.44	1.12	20.56	+14.05	2.93	6.65	+4.54
pH 9	100	30	100	10.67	3.52	1.62	29.66	+23.15	4.23	9.60	+7.49
pH 10	100	30	100	12.29	4.91	2.26	41.30	+34.79	5.89	13.36	+11.25
pH 11	100	30	100	14.19	3.60	1.66	30.31	+23.80	4.32	9.81	+7.70
pH 12	100	30	100	20.71	2.10	0.97	17.67	+11.16	2.52	5.72	+3.61
pH 13	100	30	100	353.82	1.73	0.79	14.53	+8.02	2.07	4.70	+2.59
Control	28	-	-	28.67	0.77	0.36	6.51	6.51	0.93	2.11	2.11

ตารางที่ 4.20 ค่าสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ในการศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของ แก๊สหุงต้ม (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ต่อ กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาหมัก 60 วัน

สภาวะ	Temp. (°C)	Time (นาท)	Fe ⁰ (g/kg TVS)	ค่าสารเคมี (บาท/Kg TVS)	ปริมาณแก๊ส (m ³ /kg TVS)	ทดแทนแก๊สหุงต้ม			ทดแทนพลังงานไฟฟ้า		
						ทดแทนแก๊สหุงต้ม (kg LPG/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่ายเพิ่มจากสภาวะควบคุม	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (kW/hr)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่ายเพิ่มจากสภาวะควบคุม
pH 10	100	30	20	12.29	2.82	1.30	23.78	+17.04	3.39	7.69	+5.51
pH 10	100	30	40	12.29	4.43	2.04	37.27	+30.53	5.31	12.06	+9.88
pH 10	100	30	60	12.29	7.53	3.46	63.39	+56.65	9.04	20.51	+18.33
pH 10	100	30	80	12.29	6.71	3.09	56.49	+49.75	8.05	18.28	+16.10
pH 10	100	30	100	12.29	5.70	2.62	47.95	+41.21	6.83	15.51	+13.33
pH 10	100	30	120	12.29	4.76	2.19	40.05	+33.31	5.71	12.96	+10.78
pH 10	100	30	140	12.29	4.30	1.98	36.17	+29.43	5.16	11.70	+9.52
pH 10	100	30	160	12.29	4.04	1.86	34.02	+27.28	4.85	11.01	+8.83
pH 10	100	30	180	12.29	2.72	1.25	22.90	+16.16	3.26	7.41	+5.23
pH 10	100	30	200	12.29	2.17	1.00	18.31	+11.57	2.61	5.92	+3.74
Control	28	-	-	28.67	0.80	0.37	6.74	6.74	0.96	2.18	2.18

ตารางที่ 4.21 ค่าสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 3%TS ในศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของ แก๊สหุงต้ม (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ต่อ กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาหมัก 60 วัน

สภาวะ	Temp. (°C)	Time (นาที)	Fe ⁰ (g/kg TVS)	ค่าสารเคมี (บาท/kg TVS)	ปริมาณแก๊ส (m ³ /kg TVS)	ทดแทนแก๊สหุงต้ม			ทดแทนพลังงานไฟฟ้า		
						ทดแทนแก๊สหุงต้ม (kg LPG/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่ายเพิ่มจากสถานะควบคุม	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (kW/hr)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/kg TVS)	ทดแทนค่าใช้จ่ายเพิ่มจากสถานะควบคุม
pH 10	100	5	60	12.29	2.82	1.30	23.72	+17.12	3.38	7.67	+5.53
pH 10	100	10	60	12.29	3.28	1.51	27.59	+20.99	3.93	8.93	+6.79
pH 10	100	15	60	12.29	3.46	1.59	29.13	+22.53	4.15	9.43	+7.29
pH 10	100	20	60	12.29	3.47	1.60	29.19	+22.59	4.16	9.44	+7.30
pH 10	100	25	60	12.29	3.79	1.74	31.93	+25.33	4.55	10.33	+8.19
pH 10	100	30	60	12.29	7.49	3.45	63.07	+56.47	8.99	20.41	+18.27
pH 10	100	35	60	12.29	7.67	3.53	64.56	+57.96	9.20	20.88	+18.74
pH 10	100	40	60	12.29	7.44	3.42	62.63	+56.03	8.93	20.26	+18.12
pH 10	100	45	60	12.29	7.37	3.39	62.06	+55.46	8.85	20.08	+17.94
pH 10	100	50	60	12.29	6.92	3.18	58.28	+51.68	8.31	18.86	+16.72
pH 10	100	55	60	13.03	6.74	3.10	56.72	+50.12	8.09	18.35	+16.21
Control	28	-	-	28.67	0.78	0.36	6.60	6.60	0.94	2.14	2.14

ไบโอแก๊ส 1 m^3 สามารถทดแทนแก๊สหุงต้ม (LPG) ได้ 0.46 kg (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548) และราคาแก๊สหุงต้ม (LPG) กิโลกรัมละ 18.3 บาท (ราคาของ Unique Gas เชื้อราคาจาก ปตท. วันที่ 10 มีนาคม พ.ศ 2559) และสำหรับการใช้ไบโอแก๊สเพื่อทดแทนพลังงานไฟฟ้า ไบโอแก๊ส 1 m^3 สามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้า ได้ 1.2 kW/hr (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2545) ราคาไฟฟ้าคิดจากค่าเฉลี่ยหน่วยของพลังงานไฟฟ้า 2.2695 บาทต่อหน่วย (หน่วยไฟฟ้าคือ kW/hr) (การไฟฟ้านครหลวง, 2559)

จากตารางที่ 4.18 ผลการศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหย ที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 30 นาที มีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส 12.29 บาท/kg TVS เกิดปริมาณไบโอแก๊สสูงที่สุด ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับแก๊สหุงต้มที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม $+11.38$ บาท/kg TVS และสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้า ที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม $+3.68$ บาท/kg TVS ขณะที่สภาวะควบคุมมีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสเท่ากับ 28.67 บาท/kg TVS สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ 6.43 บาท/kg TVS และสามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้า 2.08 บาท/kg TVS ไบโอแก๊สที่เกิดที่สภาวะ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 30 นาที เป็นสภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณไบโอแก๊สมากที่สุด และคุ้มค่าที่สุด

จากตารางที่ 4.19 ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 30 นาที เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS มีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส 12.29 บาท/kg TVS เกิดปริมาณไบโอแก๊สสูงที่สุด ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับแก๊สหุงต้มที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม $+34.79$ บาท/kg TVS และสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้า ที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม $+11.25$ บาท/kg TVS ขณะที่สภาวะควบคุมมีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสเท่ากับ 28.67 บาท/kg TVS สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ 6.51 บาท/kg TVS และสามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้า 2.11 บาท/kg TVS ไบโอแก๊สที่เกิดที่สภาวะ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 30 นาที เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS เป็นสภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณไบโอแก๊สมากที่สุด และคุ้มค่าที่สุด

จากตารางที่ 4.20 ผลจากการศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 30 นาที เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS มีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส 12.29 บาท/kg TVS เกิดปริมาณไบโอแก๊สสูงที่สุด ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับแก๊สหุงต้มที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม $+56.65$ บาท/kg TVS และสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้า ที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม $+18.33$ บาท/kg TVS

ขณะที่สภาวะควบคุมมีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสเท่ากับ 28.67 บาท/kg TVS สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ 6.74 บาท/kg TVS และสามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้า 2.18 บาท/kg TVS ไบโอดีแก๊สที่เกิดที่สภาวะ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 30 นาที เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS เป็นสภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณไบโอดีแก๊สมากที่สุด และคุ้มค่ามากที่สุด

จากตารางที่ 4.21 ผลจากศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอดีแก๊ส ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 35 นาที เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS มีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส 12.29 บาท/kg TVS เกิดปริมาณไบโอดีแก๊สสูงที่สุด ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับแก๊สหุงต้มที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม +57.96 บาท/kg TVS และสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้า ที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม +18.74 บาท/kg TVS และที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 30 นาที เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS มีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส 12.29 บาท/kg TVS เกิดปริมาณไบโอดีแก๊สสูงที่สุด ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับแก๊สหุงต้มที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม +56.47 บาท/kg TVS และสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้า ที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม +18.27 บาท/kg TVS มีค่าใกล้เคียงกับการไฮโดรไลซิสที่เวลา 35 นาที ขณะที่สภาวะควบคุมมีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสเท่ากับ 28.67 บาท/kg TVS สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ 6.60 บาท/kg TVS และสามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้า 2.14 บาท/kg TVS ไบโอดีแก๊สที่เกิดที่สภาวะ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เวลาในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 30 นาที เหล็กประจุศูนย์ 60 g/kg TVS เป็นสภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณไบโอดีแก๊สมากที่สุด และคุ้มค่ามากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

กากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและโรงงานผลิตฟรุกโตสและสารให้ความหวาน มีองค์ประกอบของแป้งและเส้นใยที่สูง (Sriroth et al., 2000a) ทำให้กากมันสำปะหลังสำปะหลังได้รับความสนใจเพื่อนำมาใช้ในการผลิตไบโอแก๊สมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่าการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังสำปะหลังยังมีโครงสร้างที่จำกัด เนื่องจากโครงสร้างหลักของกากมันสำปะหลังประกอบด้วยลิกโนเซลลูโลส และขนาดธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดได้ไม่สมบูรณ์ในเวลาที่ยำกัด อัตราการสร้างแก๊สจึงต่ำ และจากการศึกษาหลักประจุศูนย์ พบว่า เป็นวัสดุโลหะราคาถูก เป็นตัวรีดิวซึ่งเอเจนต์ที่แรง (Farrell et al., 2000) หรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ดี เนื่องจากมีศักย์การนำไฟฟ้าต่ำกว่าคาร์บอน ไดออกไซด์ น้ำ และมีเทน ซึ่งมีค่า $E^0 = -0.447 \text{ V}$ (Klas and Kirk, 2013) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนในกากตะกอนจากถังตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสียขึ้นที่ 2 มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนได้ถึง 91.5% จากหลักประจุศูนย์ที่เพิ่มเข้ามาในระบบ 100 g/kg VSS การศึกษาในครั้งนี้จึงมีการศึกษาสถานะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยใช้หลักประจุศูนย์ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส
2. ศึกษาปริมาณของหลักประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ
 - 2.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้หลักประจุศูนย์ 100 g/kg TVS
 - 2.2 ศึกษาปริมาณหลักประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส
 - 2.3 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมัน ระเหยง่ายที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส

ผลจากการทดลอง การหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้น ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบสที่ pH 1-13, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณกากมันสำปะหลังสดที่ใช้คือ 100 กรัม ต่อ ปริมาณน้ำหมักกรด 850 ml เมื่อทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและเบส ปริมาตรรวมของสารตัวอย่าง ประมาณ 950 ± 20 ml ซึ่งปริมาณกากมันสำปะหลังสดต่อน้ำหมักกรดที่ใช้ มีความเข้มข้นในรูปของของแข็งทั้งหมด 3%TS จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ อยู่ในช่วง 6.09 – 564.46 mg $C_6H_{12}O_6$ /g TS ส่วนกรดไขมันระเหยง่าย อยู่ในช่วง 6.19 – 27.28 mg CH_3COOH /g TS ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน จึงได้มีการนำปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจากทุกสภาวะไปทำการศึกษาผลการผลิตไบโอแก๊ส

ผลของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นภายหลังจากไฮโดรไลซิส ต่ออัตราการเกิดไบโอแก๊ส ที่ระยะเวลาในการหมัก 60 วัน จะพบว่าปริมาณไบโอแก๊สสะสมและอัตราการเกิดไบโอแก๊ส ที่สภาวะควบคุมความเข้มข้น 3%TS ที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยากับกรดเบสใดๆ ปรับ pH ให้เป็นกลาง เติมสารละลายอาหารแล้วหมักกับเชื้อจุลินทรีย์ใน อัตราส่วนที่เท่ากันกับ pH อื่นๆ จะเห็นว่าอัตราการเกิดไบโอแก๊ส คือ $0.763 \text{ m}^3/\text{kg TVS}$ สำหรับสภาวะที่มีการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ด้วยกรดและเบส อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จะพบว่าที่ pH 10 มีแนวโน้มอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มมีอัตราการผลิตไบโอแก๊สคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน ซึ่งมีอัตราการผลิตไบโอแก๊สมีค่ามากกว่าที่ pH อื่นๆ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดของแต่ละค่า pH จะพบว่าที่ pH 10 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดคือ $2.115 \text{ m}^3/\text{kg TVS}$ และมีค่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าสภาวะควบคุม 177.61%, pH 1 465.91%, pH 2 402.95%, pH 3 330.67%, pH 4 197.47%, pH 5 182.55%, pH 6 139.51%, pH 7 116.27%, pH 8 101.05%, pH 9 48.82%, pH 11 47.39%, pH 12 72.46% และ pH 13 262.41% และจากการทดสอบทางสมมติฐานโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ที่นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะพบว่าค่า Significant < 0.05 แสดงว่า pH 10 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดแตกต่างจากทุกๆ สภาวะ จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดในขั้นต้นสภาวะ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังคือการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10

5.1.2 ศึกษาปริมาณของเหล็กประจุศูนย์ต่อการเกิดไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง

5.1.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS

ผลจากการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 100 g/kg TVS ที่เวลา 60 วัน ภายหลังการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดและเบส ที่ pH 1 – 13 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ที่สภาวะควบคุม มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 0.774 m³/kg TVS และจากการศึกษาพบว่าที่ pH 10 มีแนวโน้มอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้นเรื่อยๆ สามารถผลิตไบโอแก๊สมีค่ามากกว่าที่ pH อื่นๆ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดของแต่ละค่า pH จะพบว่าที่ pH 10 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุดคือ 4.906 m³/kg TVS และมีค่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าสภาวะควบคุม 503.81%, pH 1 441.33%, pH 2 391.02%, pH 3 302.11%, pH 4 164.68%, pH 5 149.44%, pH 6 131.16%, pH 7 119.45%, pH 8 101.13%, pH 9 39.45%, pH 11 36.45%, pH 12 134.13% และ pH 13 184.72% และจากการทดสอบทางสมมติฐานโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ที่นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะพบว่า ค่า Significant < 0.05 แสดงว่า pH 10 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุดแตกต่างจากทุกๆสภาวะ จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS คือ การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

เมื่อทำการเปรียบเทียบสภาวะที่มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดระหว่างสภาวะที่มีการเติมเหล็กประจุศูนย์ และไม่มีการเติมเหล็กประจุศูนย์ จะพบว่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เมื่อเติมเหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 4.906 m³/kg TVS และอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงสุดเมื่อไม่มีการเติมเหล็กประจุศูนย์ ที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ในหัวข้อ 4.1.1 มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 2.115 m³/kg TVS จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า เมื่อมีการเติมเหล็กประจุศูนย์เข้าสู่ระบบการผลิตไบโอแก๊สจะทำให้อัตราการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ถึง 131.85% นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากการทดลองมีปริมาณสูงกว่างานวิจัยของ Zhang et al. (2014) ที่ใช้ในการอ้างอิงปริมาณเหล็กประจุศูนย์ ที่เข้าสู่ระบบ 100 g/kg TVS โดยผลจากการทดลองให้ปริมาณไบโอแก๊สสะสมมากถึง 1,653%

5.1.2.2 ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

ผลจากการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สภายหลังจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ด้วยเบสที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เพื่อหาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สที่สูงสุดพบว่าปริมาณไบโอแก๊สที่สะสมและอัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสมในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ที่สภาวะควบคุม มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 0.801 m³/kg TVS และจากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/ kg TVS มีแนวโน้มอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้นเรื่อยๆ สามารถผลิตไบโอแก๊สมีค่ามากกว่าการใช้เหล็กประจุศูนย์เข้มข้นอื่นๆ มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุดคือ 7.530 m³/kg TVS และมีค่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าสภาวะควบคุม 840.79%, ZVI 20 g/kg TVS 166.77%, ZVI 40 g/kg TVS 70.17%, ZVI 80 g/kg TVS 12.28%, ZVI 100 g/kg TVS 32.39%, ZVI 120 g/kg TVS 58.37%, ZVI 140 g/kg TVS 75.34%, ZVI 160 g/kg TVS 86.46%, ZVI 180 g/kg TVS 176.95% และ ZVI 200 g/kg TVS 246.46% จากการทดสอบทางสถิติโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ที่นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะพบว่า ค่า Significant < 0.05 แสดงว่าเหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุดแตกต่างจากทุกๆสภาวะ

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยเบสที่ pH 10, อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาทีคือเหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

5.1.2.3 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

ผลจากการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สภายหลังจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS โดยใช้เหล็กประจุศูนย์ที่ความเข้มข้น 60 g/kg TVS พบว่าปริมาณไบโอแก๊สที่สะสมและอัตราการผลิตไบโอแก๊สสะสมในการทดลองแบบกะ (Batch Test) ที่เวลา 60 วัน ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 10 , อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน จากการศึกษพบว่าที่สภาวะควบคุม มีอัตราการผลิตไบโอแก๊ส 0.784 m³/kg TVS สำหรับการย่อยสลายกากมันสำปะหลังที่เวลา 35 นาที มีแนวโน้มอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสามารถผลิตไบโอแก๊สสะสมได้สูงกว่าไบโอแก๊สที่การย่อยสลายกากมันสำปะหลังที่เวลาอื่นๆ โดยมีอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงที่สุดคือ 7.669 m³/kg TVS และมีค่าอัตราการผลิตไบโอแก๊สสูงกว่าสภาวะควบคุม 879.15%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที 171.06%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที 132.25%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที 120.10%, เวลา

ในการทำปฏิกิริยา 20 นาที 119.03%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที 100.54%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที 1.66%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที 2.42%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที 3.37%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที 10.18% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 55 นาที 13.45%

เมื่อทดสอบข้อมูลดังกล่าวโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ ที่นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะพบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 35 และ 40 นาที ค่า Significant > 0.05 แสดงว่า ข้อมูลทางสถิติทั้ง 3 ชุดการทดลอง มีอัตราการผลิตไบโอแก๊สไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ไม่ว่าจะทำการย่อยสลายกากมันสำปะหลังที่เวลาเท่าไรในทั้ง 3 ช่วงเวลา อัตราการเกิดไบโอแก๊สในระบบก็ไม่มีแตกต่างกัน จึงสรุปได้ว่า ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดทั้งในแง่ของปริมาณและความคุ้มค่า การย่อยสลายกากมันสำปะหลังในช่วง pH 10 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอแก๊ส เมื่อมีการเติมเหล็กประจุศูนย์ความเข้มข้น 60 g/kg TVS

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 ความล่าช้าในการศึกษา เนื่องจากการทดลองในแต่ละชุดการทดลอง จำเป็นจะต้องได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังของการทดลองก่อนหน้า เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป กล่าวคือ ต้องศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg TVS ให้แล้วเสร็จ เพื่อให้ทราบ pH ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส ก่อนจะเข้าสู่การศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส และต้องศึกษาขั้นตอนนี้ให้แล้วเสร็จ เพื่อให้ทราบถึง ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส ถึงจะสามารถทำการทดลองในขั้นตอนสุดท้าย คือ ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สได้ เวลาที่ใช้ในการทดลอง จึงค่อนข้างล่าช้า

5.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบองค์ทางเคมีของเหล็กประจุศูนย์แต่ละชุดการทดลอง เนื่องจากเครื่องมือมีจำกัด ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ F10 จึงจำกัดการเข้าใช้งานต่อ 1 คนได้ไม่เกิน สัปดาห์ละ 1 วัน ทำให้การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กประจุศูนย์ค่อนข้างเป็นไปด้วยความลำบาก ภายใน 1 วันสามารถวิเคราะห์ชิ้นงานได้สูงสุดเพียง 5 ตัวอย่าง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์

การทดลองทั้งหมดเป็นแนวทางในการศึกษาความเหมาะสม ในการใช้เหล็กประจุศูนย์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังเข้มข้น 3%TS ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเบส อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที สำหรับกากมันสำปะหลังสำปะหลังที่เหลือจากกระบวนการผลิตมันเส้น จากบริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคโรราช จำกัด เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง ซึ่งมีความสามารถในการผลิตไบโอแก๊สได้มากกว่าสถานะที่ไม่ใช้เหล็กประจุศูนย์ถึง 131.85% ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเหล็กประจุศูนย์สามารถเพิ่มอัตราการผลิตไบโอแก๊สได้ หากแต่ต้องมีการนำเหล็กประจุศูนย์ภายหลังการหมัก ไปบำบัดในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.3.2 งานวิจัยในขั้นต่อไป

5.3.2.1 เนื่องจากมีปัญหาเรื่องปริมาณเหล็กประจุศูนย์ มีผลต่อจุลินทรีย์ หากมีการแยกถึงปฏิกิริยาออกเป็น 3 ถัง คือถังปฏิกิริยาที่ 1 เป็นถังหมักกรด น้ำตาลและกรดไขมันจะถูกย่อยสลาย แล้วเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA), CO₂ และ H₂ กรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในถังหมักกรด หรือถังปฏิกิริยาที่ 1 จะไหลเข้าสู่ ถังปฏิกิริยาที่ 2 ซึ่งเป็นถังที่มีเหล็กประจุศูนย์ อยู่ในใน เพื่อทำปฏิกิริยากับ VFA ให้ VFA โมเลกุลใหญ่ อย่าง Propionate และ Butyrate เปลี่ยนไปเป็น Acetic acid ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดไบโอแก๊ส เนื่องจากการให้อิเล็กตรอนกับ CO₂ และ H₂ จากนั้น Acetic acid ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาที่ 2 จะไหลเข้าสู่ถังปฏิกิริยาที่ 3 เป็นถังผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งเป็นถังที่จุลินทรีย์สามารถสร้างมีเทนในระบบได้ และปริมาณเหล็กที่เดิมเข้าสู่ระบบไม่มีผลไปยังการสร้างมีเทนของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ ผู้วิจัยคาดว่าวิธีดังกล่าวยังเป็นการลดการกำจัดเหล็กที่ออกจากระบบอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากเราสามารถกำจัดเหล็ก โดยการกำจัดที่ถังปฏิกิริยาที่ 2 ได้เลย และเหล็กประจุศูนย์ก็ไม่มีการปนเปื้อนในตะกอนหรือกากมันสำปะหลังที่เข้าสู่ระบบอีกด้วย

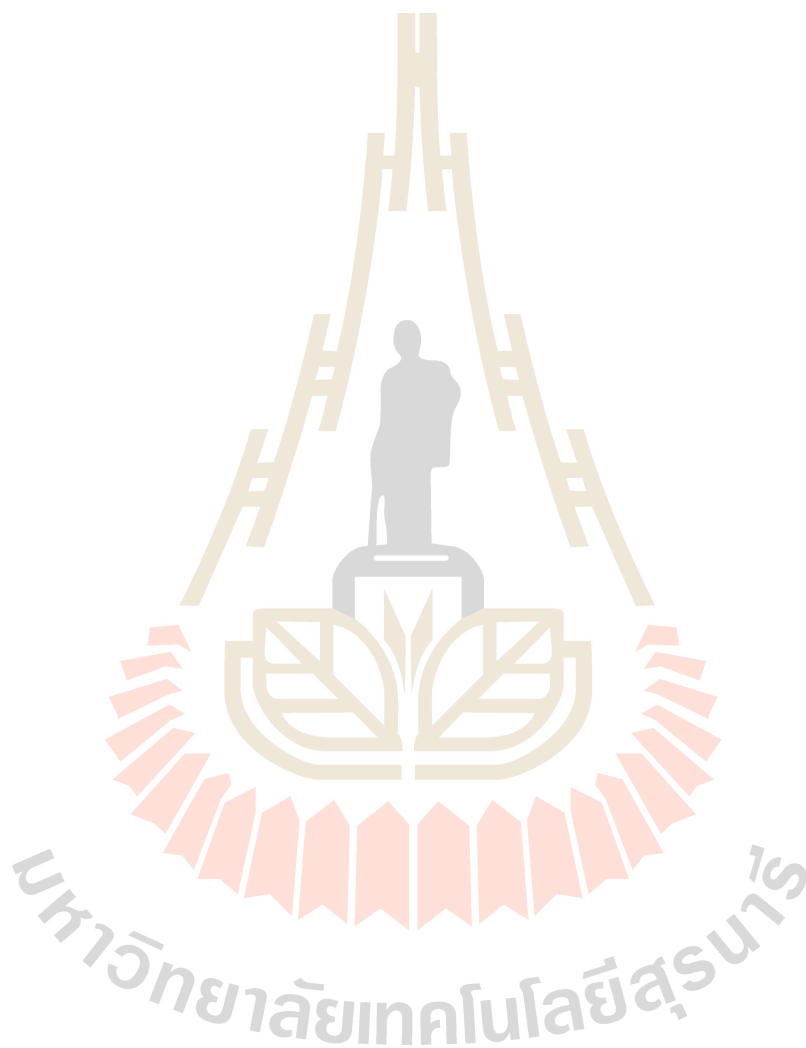
5.3.2.2 เหล็กประจุศูนย์ที่ทำการทดสอบเป็นเหล็กประจุศูนย์ที่ได้จากการซื้อตามท้องตลาด ซึ่งมีราคาแพงกว่าเศษเหล็กเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นหากมีการนำเศษเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ในการผลิตไบโอแก๊ส นอกจากจะเป็นลดต้นทุนในการส่งเศษเหล็ก

เหล่านั้นไปกำจัด ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้เศษเหล็กดังกล่าวได้อีกวิธี และยังเป็นการสร้าง ความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างอุตสาหกรรมกับสถาบันการศึกษาในอนาคตอีกด้วย

5.3.2.3 ในการวิเคราะห์หลักประจุศูนย์ที่ใช้ในการศึกษา สามารถทำได้โดยใช้ เครื่องมือวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็น Transmission Electron Microscope (TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่าน ทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง นั้นเอง ให้ภาพลักษณะ 2 มิติ เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายใน ของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะ ให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร) หรือ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) ใช้แสงในย่านของ soft X-ray เพื่อการกระตุ้นให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนและเน้นที่การวิเคราะห์ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในสุด (core electron) เนื่องจากค่าพลังงานดังกล่าวเป็นค่า เฉพาะของอะตอมในแต่ละธาตุและขึ้นอยู่กับสถานะทางเคมีของอะตอมนั้น การวิเคราะห์ดังกล่าว จึงสามารถระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของสารที่ต้องการ วิเคราะห์ได้

- สามารถระบุชนิดของธาตุ (ตั้งแต่ Li ถึง U) ที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของวัสดุ
- สามารถระบุสถานะทางเคมี (chemical state) เช่น สถานะทางออกซิเดชัน (oxidation state) หรือ พันธะทางเคมีระหว่างอะตอม ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้ ตัวอย่างเช่น สามารถระบุหรือแยก Al-metal ออกจาก Al-oxide ได้
- สามารถระบุร้อยละที่มีอยู่ของธาตุที่สนใจเทียบกับธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบ
- เป็นเทคนิคที่วัดคุณสมบัติของสารในระดับพื้นผิว (surface sensitive) ที่ระดับ 5 – 100 อังสตรอม (Angstroms) เหมาะสำหรับสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง
- ไม่ทำลายคุณสมบัติของสารในการวัด
- สามารถตรวจวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อยๆ หรือความเข้มข้นต่ำในระดับร้อยละ 0.1 (parts per thousand range)

- การทดลองทำในระบบสุญญากาศความดันต่ำกว่า 10-9 mbar
- สามารถระบุการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิว การกระจายตัวของธาตุตัวด้านข้างจากการปรับตำแหน่งของการวัดและการกระจายตัวของธาตุตัวในแนวลึกจากการใช้เทคนิค depth profile



รายการอ้างอิง

- กิตติกานท์ สุขวานิชย์. (2554). การเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและด่าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- กิตติกานท์ ดรุยานนท์. (2552). การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนจากกระบวนการผลิตเอทานอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2540). คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันต์ดแปร และแป้งมันแปรรูป. กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.
- กัลยา จันทร์อรุณ. (2533). เคมีอาหาร. ตำรา-เอกสารวิชาการ. ฉบับที่ 35. ภาคพัฒนาตำราและเอกสารวิชาการ ศึกษานิเทศน์. กรมการฝึกหัดครู.
- กัลยา อยู่นาน. (2546). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลจากเปลือกและกากมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด. (2550). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์สถานภาพการผลิตหัวมันสำปะหลังและคุณภาพหัวมันสำหรับการผลิตเอทานอลเพื่อเป็นเชื้อเพลิง. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. กรุงเทพมหานคร.
- ไกรวุฒิ พวงเพชร. (2550). ผลการบำบัดขึ้นต้นด้วยเอนไซม์ต่อการย่อยสลายกากมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งแบบไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์. (2546). การศึกษาด้านแบบโรงงานเอทานอลโดยการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตจากมันเส้น. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. กรุงเทพมหานคร.
- ชงชาติ สุริยวงศ์. (2556). ผลของกากมันสำปะหลังเสริมด้วยเอนไซม์ไซลาลเนสต่อการย่อยได้ของโภชนาสมรรถนะการเจริญเติบโต และคุณภาพซากของไก่เนื้อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- ธีรภัทร ศรีนรคุตร, เลิศลักษณ์ แก้ววิมล และละอียด แซ่โง้ง. (2549). การย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในประเทศไทย. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: 31(1)
- บริษัท เสงีสว่างพัฒนาพลังงาน จำกัด (2558). การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังในระบบ Covered Lagoon. โครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- ปรีดา คำศรี, ยูเรศ เรืองพานิช, เสกสม อาตมางกูร, อรประพันธ์ ส่งเสริม และณัฐชนก อมรเทวกัทร. (2552). ผลของระดับกากมันสำปะหลังและรูปแบบอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตในไก่เนื้อ. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47. สาขาสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: 132-140.
- พงษ์พันธุ์ พรหมพิพัตต์และชนากร วงวัฒนาเสถียร. (2554). การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊ส จากกากมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พิชชา สวยสม และคณะ. (2550). รายงานวิจัยเรื่อง สมรรถนะการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลังและการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตด้วยความร้อนหรือเอนไซม์. สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พรณวิไล กิ่งสุวรรณรัตน์. (2545). การผลิตเอทานอลจากเหง้ามันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรวสา วงศ์ปัญญา. (2551). แผนภูมิสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ (The Iron-Iron Carbide Equilibrium Diagram). เอกสารประกอบการสอนวิชา 43 1203 Physical Metallurgy II สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ภาควิชาการศึกษาที่ 2/2551. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มาศยา โชคสงวน. (2553). ผลของการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดต่อการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์. (2558). กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. *Veridian E-Journal. Science and Technology Silpakorn University*. ISSN 2408-1248: 1543-1557
- วริยา โกสุม, นารีรัตน์ เจริญวัฒนสกุล, ยูเรศ เรืองพานิช, สุกัญญา รัตนทับทิมทอง และ เสกสม อาตมางกูร. (2552). คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของกากมันสำปะหลัง. การ

ประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47. สาขาสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: 117-124.

วรรณวิภา ผลาหาญ. (2547). การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยใช้เศษผงเหล็ก. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**

ศุทธวี วีระพงษ์. (2548). การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียม โดยใช้เศษผงเหล็ก. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**

ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณวาทกสิกิจฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2550). “การใช้กากมันสำปะหลังแห้งเป็นอาหารสัตว์.” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.rdi.ku.ac.th/kufair50/animal/11_12_animal/11_2_animal.html. (13 มกราคม 2559).

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2551). **โครงการส่งเสริมการผลิตไบโอแก๊สจากกากมันสำปะหลัง.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.erd.or.th/~biogasstarch/> (20 กรกฎาคม 2559).

สันติ เตชะกัมพูช. (2548). **เคมีทั่วไป เล่ม 1.** พิมพ์ครั้งที่ 8 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 380 หน้า.

สุเมธ ไตรพฤษชาติ, ยูเรศ เรืองพานิช, เสกสม อาตมางกูร, อรประพันธ์ ส่งเสริม และสุกัญญา รัตนทับทิมทอง. (2552). ผลของระดับกากมันสำปะหลังในอาหารไก่ไข่ต่อสมรรถภาพการผลิตและคุณภาพไข่. **การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47. สาขาสัตวศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: 165-173.**

อริญา ลากโคกสูง. (2555). ผลของปริมาณอะมิโลสและโครงสร้างอะมิโลเพคตินในสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่างๆ ต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ชนิดที่ 3. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

อุดมเกียรติ พรพรรณประเทศ. (2536). อิทธิพลของการย่อยสตาร์ชด้วยกรดและเอนไซม์ต่อองค์ประกอบของน้ำตาลจากแป้ง 4 ชนิด. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**

Agu, R.C., Amadife, A.F., Ude, C.M., Onyia, A., Ogu, L.U., Oka, M., and Ezejiofor, R.T. (1997). Combined heat treatment and acid hydrolysis of cassava grate waste (CGW) Biomass Ethanol Production. **Waste Management** 17: 91-96.

- Ali, D., Soewarno, N., Sumarno P., Primarini, D., and Sumaryono, W. (2011). Cassava pulp as a biofuel feedstock of an enzymatic hydrolysis process. **MAKARA. J. Technology** 2: 183-192.
- Antonio Zamora. (2016). โครงสร้างทางเคมีของคาร์โบไฮเดรต. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates1.html> (10 กรกฎาคม 2559).
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (1990). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. **15th edition. Arlington:** Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J. and Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science** 34: 755-781.
- APHA, AWWA, and WEF. (2005). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** Washington D.C.: American Public Health Association.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (1990). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 15th edition. **Arlington: Association of Official Analytical Chemists, Inc.**
- Bang, S., Korfiatis, G.P., and Meng, X. (2005). Removal of arsenic from water by zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials** 121: 61-67.
- Barros, A.R., Silva, E.L. (2012). Hydrogen and ethanol production in anaerobic fluidized bed reactors: performance evaluation for three support materials under different operating conditions. **Biochem Engineering** 61: 59-65.
- Bastawde, K.B. (1992). Xylan structure, microbial xylanases and their mode of action. **World Journal of Microbiol and Biotechnology** 8 : 355-368.
- Batstone, D.J., Keller, J.I., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist, H., and Vavilin, V.A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). **Water Science and Technology** 45(10): 65-73.
- Bemiller, J.N., and Roberts, H.J. (1965). **Starch chemistry and Technology.** Vol.1, Academic Press: New York and London.
- Berthouex, P.M., and Brown, L.C. (2002). Statistics for Environmental Engineers, 2nd Edition. **Lewis Publishers/CRC Press, Boca Raton, FL.** 489 pp.

- Beynum, G.Y.M., and Roles, J.A. (1985). **Starch Conversation Technology**. Mareel Dekker, Inc: New York, 326p.
- Bhattacharya, S.C., Abdul Salam, P., and Sharma, M. (2000). Emissions from Biomass Energy Use in Some Selected Asian Countries. **Renewable Energy** 25: 169-188.
- Bond, T., and Templeton, M.R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy for Sustainable Development** 15: 347-354
- Boopathy, R. (1998). Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactors. **Bioresource Technology** 64: 1-6.
- Bougrier, C., Albasi, C., Delgenes, J.P., and Carrere, H. (2006). Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. **Chemical Engineering and Processing** 45: 711-718.
- Brunow, G., Kilpeläinen, I., Sipilä, J., Syrjänen, K., Karhunen, P., Setälä, H., and Rummakko, P. (1998). Oxidative coupling of phenols and the biosynthesis of lignin; in: Lignin and Lignan Biosynthesis. Eds. N.G. Lewis, S. Sarkanen, American Chemical Society, ACS Symposium Series 697. Washington DC. USA: 131-147.
- Browning, B.L. (1963). Method in wood chemistry: 389-407. **Interscience Publishers**. New York. London.
- Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., and Ferrer, I. (2010). Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. **Journal of Hazardous Materials** 183: 1-15.
- Chandra, R., Takeuchi, H., and Hasegawa, T. (2012). Methane Production from Lignocellulosic Agricultural Crop Wastes: A Review in Context to Second Generation of Biofuel Production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 16: 1462-1476.
- Chang, C.-N., Ma, Y.-S. and Lo, C.-W. (2002). Application of oxidation-reduction potential as a controlling parameter in waste activated sludge hydrolysis. **Chemical Engineering Journal** 90: 273-281.
- Chang, T-C., You, S-J., Damodar, R.A., and Chen, Y-Y. (2011). Ultrasound pre-treatment step for performance enhancement in an aerobic sludge digestion process. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers** 42: 801-808.

- Chase, C.L. (1968). THE IMPACT OF SOME OBVIOUS VARIABLES ON ESSAY TEST SCORES. **Journal educational measurement** 5(4): 315-333
- Cheng, J., Su, H., Zhou, J., Song, W., & Cen, K. (2011). Microwave-assisted alkali pretreatment of rice straw to promote enzymatic hydrolysis and hydrogen production in dark- and photo-fermentation. **International Journal of Hydrogen Energy** 36(3): 2093-2101.
- Chatterjee, S., Lim, S.R., Woo, S.H. (2010). Removal of reactive black 5 by zero-valent iron modified with various surfactants. **Chemical Engineering Journal** 160: 27-32.
- Chiu, Y.-C., Chang C.-N., Lin, J.-G. and Huang, S.-J. (1997). Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion. **Water science and technology** 36: 155-162
- Chu, L.B., Wang, J.L., Wang, B., Xing, X.H., and Yan, S.T. (2009). Changes in biomass activity and characteristics of activated sludge exposed to low ozone dose. **Chemosphere** 77: 269-272.
- Comino, E., Rosso, M., and Riggio, V. (2009). Development of a Pilot Scale Anaerobic Digester for Biogas Production from Cow Manure and Why They Mix. **Bioresource Technology** 100: 5072-5078.
- Daniels, L., Belay, N., Rajagopal, B.S., and Weimer, P.J. (1987). Bacterial methanogenesis and growth from CO₂ with elemental iron as the sole source of electrons. **Science (New York, N.Y.)** 237: 509-511.
- Dinh, H.T., Kuever, J., Mussmann, M., Hassel, A.W., Stratmann, M., and Widdel, F. (2004). Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms. **Lett. Nat** 427: 829-832.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., and Smith, F. (1956). Colorimetric method for the determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**. 28(3): 350-356.
- Dumas, C., Perez, S., Paul, E. and Lefebvre, X. (2010). Combined thermophilic aerobic process and conventional anaerobic digestion: Effect on sludge biodegradation and methane production. **Bioresource Technology** 101: 2629–2636.
- Elbeshbishy, E., and Nakhla, G. (2011). Comparative study of the effect of ultrasonication on the anaerobic biodegradability of food waste in single and two-stage systems. **Bioresource Technology** 102(11): 6449-6457.

- Enning, D., and Garrelfs, J. (2014). Corrosion of Iron by Sulfate-Reducing Bacteria: New Views of an Old Problem. **Applied and Environmental Microbiology** 80(4): 1226-1236
- Farrell, J., Kason, M., Melitas, N., Li, T. (2000). Investigation of the long term performance of zero-valent iron for reductive dechlorination of trichloroethylene. **Environmental Science & Technology** 34: 514 - 521.
- Feng, Y., Zhang, Y., Quan, X., and Chen, S. (2014). Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron. **Water Research** 52: 242-250.
- Fenner, H., and Elliot, J. M. (1963). Quantitative method for determining the steam volatile fatty acids in rumen fluid by gas chromatography. **Journal Animal Science** 22: 624-627.
- Fey, A. L., Clegg, A. W., and Fomalont, E. B. (2000). In **International VLBI Service for Geodesy and Astrometry: 2000 General Meeting Proceedings**, ed. N. R. Vandenberg & K. D. Baver (NASA CP-2000-209893) (Greenbelt, MD: GSFC). 164
- Glanpracha, N., and Annachatre, A.P. (2016). Anaerobic co-digestion of cyanide containing cassava pulp with pigmanure. **Bioresource Technology** 214: 112-121
- Glasauer, S., Langley, S., and Beveridge, T.J. (2001). Sorption of Fe (Fe⁰) oxides to the surface of *Shewanella putrefaciens*: cell-bound fine-grained minerals are not always formed de novo. **Apply Environmental Microbiology** 67: 5544–5550.
- Hao, X., Hu, Y., and Cao, D. (2016). Destroying lignocellulosic matters for enhancing methane production from excess sludge. **Bioresource Technology** 37: 1-23.
- Hao, X., Wei, J., Loosdrecht, C.M., and Cao, D. (2017). Analysing the mechanisms of sludge digestion enhanced by iron. **Water Research** 117: 58-67.
- Hua, Y., Barkera, R., Charpentiera, T., Wardb, M., and Nevillea, A. (2015). Relating iron carbonate morphology to corrosion characteristics for water-saturated supercritical CO₂ systems. **Journal of Supercritical Fluids** 98: 183–193
- Ho, D., Jensen, P., and Batstone, D. (2014). Effects of temperature and hydraulic retention time on acetotrophic pathways and performance in high-rate sludge digestion. **Environmental Science & Technology** 48: 6468-6476.
- Hu, Y., Hao, X., Zhao, D., and Fu, K. (2015). Enhancing the CH₄ yield of anaerobic digestion via endogenous CO₂ fixation by exogenous H₂. **Chemosphere** 140: 34-39.

- Hu, Y., Hao, X., Wang, J., and Cao, Y. (2016). Enhancing anaerobic digestion of lignocellulosic materials in excess sludge by bioaugmentation and pre-treatment. **Waste Management Journal** 49: 55-63.
- Jedrzejewska, M., Cicin' ska, M., Krzemieniewski. (2010). Effect of corrosion of steel elements on the treatment of dairy wastewater in a UASB reactor. **Environmental Technology** 31: 585–589.
- Jiang, Z., Lv, L., Zhang, W., Du, Q., Pan, B., Yang, L., Zhang, Q. (2011). Nitrate reduction using nanosized zero-valent iron supported by polystyrene resins: role of surface functional groups. **Water Research** 45: 2191–2198.
- Joshua, D.S., Aaron, G.B.W., Michelle, M.S., and Gene, F.P. (2005). Inhibition of bacterial perchlorate reduction by zero-valent iron. **Biodegradation** 16: 23–32.
- Jose, M.F.S., Eric, J.S., and Pedro, J.J.A. (2004). Effect of Fe⁰ quantity on the efficiency of integrated microbial-Fe⁰ treatment processes. **Chemosphere** 54: 823–829
- Karri, S., Sierra-Alvarez, R., and Field, J.A. (2005). Zero valent iron as an electron-donor for methanogenesis and sulfate reduction in anaerobic sludge. **Bioresource Technology** 92: 810-819.
- Kersers, I., and Verstraete, W. (1996). Inactivation of aeromonas hydrophila by Fe(II)-related-radical generation in oxidizing groundwaters. **Applied Microbiology and Biotechnology** 62: 3277–3282.
- Keum, Y.S. and Li, Q.X. (2004). Reduction of nitroaromatic pesticides with zero-valent iron. **Chemosphere** 54: 255-263.
- Khempaka, S., Molee, W., and Guillaume, M. (2009). Dried cassava pulp as an alternative feedstuff for broilers: effect on growth performance, carcass traits, digestive organs, and nutrient digestibility. **Poultry Science Research** 18: 487-493.
- Kim, D-H., Jeong, E., Oh, S-E., and Shin, H-S. (2010). Combined (alkaline D ultrasonic) pretreatment effect on sewage sludge disintegration. **Water Research** 44: 3093-3100.
- Kim, J., Park, C., Kim, T.-H., Lee, M., Kim, S., Kim, S.-W. and Lee, J. (2003). Effects of Various Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge. **Journal of Bioscience and Bioengineering** 95: 271-275.

- Kim, O., Gross, R.A., and Rutherford, D.R. (1995). Bioengineering of poly (β -hydroxyalcanoates) for advanced material applications: incorporation of cyano and nitrophenoxy side chain substituents. **Canadian Journal of Microbiology** 41: 32-43.
- Kim, T.H., F. Taylor and K.B. Hicks. (2008). Bioethanol Production from Barley Hull Using SSA (Soaking in Aqueous Ammonia) Pretreatment. **Bioresource Technology** 99: 5694-5702.
- Klas, S. and Kirk, D.W. (2013). Advantages of low pH and limited oxygenation in arsenite removal from water by zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials**: 252-253, 77-82.
- Knill, C.J. and Kennedy, J.F. (2003). Degradation of cellulose under alkaline conditions. **Carbohydrate polymer** 51: 281-300.
- Kong, X., Wei, Y., Xu, S., Liu, J., Li, H., Liu, Y., and Yu, S. (2016). Inhibiting excessive acidification using zero-valent iron in anaerobic digestion of food waste at high organic load rates. **Bioresource Technology** 211: 65-71.
- Kong, X., Yu, S., Xu, S., Fang, W., Liu, J., and Li, H. (2017). Effect of Fe^0 addition on volatile fatty acids evolution on anaerobic digestion at high organic loading rates. **Waste Management** 71: 719-727
- Laine, C. (2005). Structure of hemicelluloses and pectins in wood and pulp. **Research Projects** B1702, B3803, B3807, 3052.
- Lansing, S., Martin, J.F., Botero, R.B., Silva, T.N.D., and Silva, E.D.D. (2010). Wastewater transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters. **Biomass and Bioenergy** 34: 1711-1720
- Lavine, B.K., Auslander, G., and Ritter, J. (2001). Polarographic studies of zero valent iron as a reductant for remediation of nitroaromatics in the environment. **Microchemical Journal** 70: 69-83.
- Lee, S.G., and Kim, H.S. (2008). Optimal operation policy of the ultrafiltration membrane bioreactor for enzymatic hydrolysis of cellulose. **Biotechnology and Bioengineering** 42: 737-746.
- Lee, J.S., B. Parameswaran., J.P. Lee and S.C. Park. (2008). Recent Developments of Key Technologies on Cellulosic Ethanol Production. **Journal of Scientific & Industrial Research** 67: 865-873.

- Levin, H.M., Glass, G.V., and Meister, G.R. (1983). Cost-Effectiveness of Computer-Assisted Instruction. **SAGE Journals** 11(1): 50-72
- Li, C.Y., Guo, Z., Wang, Z. (2007). TGFbeta receptor saxophone non-autonomously regulates germline proliferation in a Smox/dSmad2-dependent manner in Drosophila testis. **Developmental Biology** 309(1): 70-77.
- Li, H., Li, C., Liu, W., and Zou, S. (2012). Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion. **Bioresource Technology** 123: 189-194.
- Liang, S., Zheng, D., Standley, DM., Guo, H., and Zhang, C. (2013). A novel function prediction approach using protein overlap networks. **BMC Systems Biology** 7: 61
- Lin, C.B., MU, C.K., Wu, W.W., and Hung, C.H. (1999). The effect of joint design and volume fraction on friction welding properties of A360/SiC (p) composites. **Welding Research Supplement**: 00-108
- Liu, H.L., Yang, D.F., Yang, H.L., Zhang, H.Z., and Zhang, W. (2013). Comparative study of respiratory tract immune toxicity induced by three sterilization nanoparticles: silver zinc oxide and titanium dioxide. **Journal of Hazardous Materials**: 248–249, 478–486.
- Liu, Y., Zhang, Y., Quan, X., Li, Y., Zhao, Z., Meng, X., and Chen, S. (2012). Optimization of anaerobic acidogenesis by adding Fe⁰ powder to enhance anaerobic wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal** 192: 179-185.
- Liu, Y., Zou, L., Ma, L., Chen, W.H., Wang, B., and Xu, Z.L. (2006). Synthesis and pharmacological activities of xanthone derivatives as alpha-glucosidase inhibitors. **Bioorganic & Medicinal Chemistry** 14(16): 5683-5690
- Matheson, L.J., and Tratnyek, P.G. (1994). Reductive dehalogenation of chlorinated methanes by iron metal. **Environmental Science & Technology** 28(12): 2045-2053.
- McCarty, A.D., and Smith, D.P. (1986). Anaerobic wastewater treatment. **Environmental Science & Technology** 20: 1200-1206.
- Meng, X., Zhang, Y., Li, Q., and Quan, X. (2013). Adding Fe⁰ powder to enhance the anaerobic conversion of propionate to acetate. **Biochemical Engineering Journal** 73: 80-85.
- Metcalf and Eddy, Inc. (2004). **Wastewater Engineering Treatment and Reuse**. International Edition, ISBN 007-124140-X, McGraw-Hill, Singapore.

- Miller, G. L. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry** 31(3): 426-428
- Nges, I.A., and Liu, J. (2009). Effects of anaerobic pre-treatment on the degradation of dewateredsewage sludge. **Renewable Energy** 34: 1795–1800.
- Noubactep, C. (2008). A critical review on the process of contaminant removal in $\text{Fe}^0\text{-H}_2\text{O}$ systems. **Bioresource Technology** 29: 909-920.
- Nybroe, O., Jorgensen, P.E., and Henze, M. (1992). Enzyme activities in waste water and activated sludge. **Water Research** 26: 579-584.
- Nybroe, P.E., Jorgensen, M., and Henze, K. (1992). Enzyme activities in waste water and activated sludge. **Water Research** 26: 579-584.
- Oh, S.-E., Van Ginkel, S., and Logan, B.E. (2003). The relative effectiveness of pH control and heat treatment for enhancing biohydrogen gas production. **Environmental Science & Technology** 37: 5186-5190.
- Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B., and Chaiprasert, P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. **Biomass and Biology** 34: 1117-1124.
- Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., Blanc, R.J., Tyagi, R.D., and Surampalli, R.Y. (2011). Ultrasonic pretreatment of sludge: A review. **Ultrasonics Sonochemistry** 18: 1–18.
- Rajagopal, B.S., and LeGall, J. (1989). Utilization of cathodic hydrogen by hydrogenoxidizing bacteria. **Applied Microbiology and Biotechnology** 31: 406-412.
- Rao, T.N., Sairam, B., Viswanathan, K., and Nair, V.K. (2000). Carbon steel corrosion by iron oxidising and sulphate reducing bacteria in a freshwater cooling system. **Corrosion Science** 42: 1417-1431.
- Rattanachomsri, U., Tanapongpipat, S., Eurwilaichirt, L. and Champreda, V. (2009). Simultaneous non-thermal saccharification of cassava pulp by multi-enzyme activity and ethanol fermentation by *Candida tropicalis*. **Journal of Bioscience and Bioengineering** 107(5): 488-493.
- Renata, M., Luiza, V. S., Mariana, M., Nina, P. G., Marcio, A., Dilson, A., and Lisiane, M. (2012). Optimization of enzymatic hydrolysis of cassava to obtain fermentable sugars*. **Journal of Biomedicine and Biotechnology** 13(7): 579-586.

- Rosalind, S.G. (1993). Nutritional assessment : a laboratory manual. **English. Book. Illustrated edition.** New York : Oxford University Press.196 p.
- Schnurer, A. and Jarvis, A. (2009). Microbiological Handbook for Biogas Plant. Swedish Waste Management. **Swedish Gas Centre.** Malmö: 1-74.
- Shahriari, H., Warith, M., Hamoda, M., and Kennedy, K. (2013). Evaluation of single vs.staged mesophilic anaerobic digestion of kitchen waste with and without microwave pretreatment. **Journal of Environmental Management** 125: 74-84.
- Sidney, H.A. (1997). Introduction To Physical Metallurgy. **New York: McGraw-Hill.** 527-536
- Sim, S., Bocher, F., Cole, I.S., Chen, X.B., and Birbilis, N. (2014). Investigating the effect of water content in supercritical CO₂ as relevant to the corrosion of carbon capture and storage. **Pipeline Corrosion** 70(2): 185-195.
- Skovhus, T.L., Enning, D., and Lee, J.S. (2005).Microbiologically Influenced Corrosion in the Upstream Oil and Gas Industry. **Taylor & Fracis Group, Boca Raton London, New York.**
- SPSS. (1989-2012). SPSS for window. Release 21 standard version. **Cary, North Carolina: SPSS Institute**
- Sriroth, K., Rojanaridpiched, C., Vichukit, V., Suriyaphan, P., and Oates, C.G. (2000 a). **Present situation and future potential of cassava in Thailand. Paper presented at The 6th regional cassava workshop.** 11-26 Feb., Ho Chi Minh city, Vietnam.
- Stacy, C.J., Foster, J.F. and Eslander, S.R. (1956). **Macromolecular Chemistry and Physics.**:17-181.
- Standard methods for the examination of water and wastewater/ prepared and published. (1992). jointly by American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation ; **joint editorial board, Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri, Andrew D. Eaton.** - 18th ed.
- Stenius, Per. (2000). Forest Products Chemistry. **Papermaking Science and Technology** 3. Finland: Fapet OY.: 35. ISBN 952-5216-03-9.
- Su, H., J.H. Jiang, C. Zhai, V. Perun, J.T. Shen, A.D. Del Genio, L.S. Nazarenko, L.J. Donner, L.W. Horowitz, C.J. Seman, C.J. Morcrette, J. Petch, M.A. Ringer, J. Cole, M. dos Santos Mesquita, T. Iversen, J.E. Kristjansson, A. Gettelman, L.D. Rotstaysn, S.J. Jeffrey, J.-L.

- Dufresne, M. Watanabe, H. Kawai, T. Koshiro, T. Wu, E.M. Volodin, T. L'Ecuyer, J. Teixeira, and G.L. Stephens. (2013). Diagnosis of regime-dependent cloud simulation errors in CMIP5 models using "A-Train" satellite observations and reanalysis data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** 118(7): 2762-2780.
- Suanon, F., Sun, Q., Yang, X., Chi, Q., Mulla, S.I., Mama, D., and Yu, C.P. (2017). Assessment of the occurrence, spatiotemporal variations and geoaccumulation of fifty-two inorganic elements in sewage sludge: A sludge management revisit. **Scientific Reports** 7(1): 5698-5979
- Suksombat, W., Lounglawan, P. and Noosen, P. (2006). Energy and protein evaluation of five feedstuffs used in diet in which cassava pulp as main energy source for lactating dairy cows. **Suranaree Journal of Science and Technology** 14: 99-107.
- Taherazdeh, M.J and Karimi, K. (2007). Acid-Based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A Review. **Bioresource** 2(3): 472-499.
- Tasic, M.B., Konstantinovic, B.V., Lazic, M.L. and Veljkovic, V.B. (2009). The acid hydrolysis of potato tuber mash in bioethanol production. **Biochemical Technology** 43: 208-210.
- Tatara, T., Makiuchi, Y., Ueno, M., Goto, K., and Sode, Y. (2008). Methanogenesis from acetate and propionate by thermophilic downflow anaerobic packed-bed reactor. **Biochemical Technology** 99: 4786-4795.
- Teerapatr, S., Lerdluk, K., and La - aied, S. (2006). Approach of cassava waste pretreatments for fuel ethanol production in Thailand. **Journal of scientific research, Chulalongkorn University** 31: 78-84.
- Tester, R.F., Karkalas, J. and Qi, X. (2004). Starch structure and digestibility enzyme substrate relationship. **World's Poultry Science Journal** 60: 185-195.
- Thang, C.M., Ledin, I., and Bertilsson, J. (2010). Effect of using cassava products to vary the level of energy and protein in the diet on growth and digestibility in cattle. **Livestock Science** 128: 166-172
- Thauer, R.K., Jungermann, K., and Decker, K. (1977). Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria. **Bacteriological Reviews** 41: 100-180.

- Uzum, C., Shahwan, T., Eroglu, A.E., Lieberwirth, I., Scott, T.B., Hallam, K.R. (2008). Application of zero-valent iron nanoparticles for the removal of aqueous Co^{2+} ions under various experimental conditions. **Chemical Engineering Journal** 144: 213-220.
- Warren, L.A., and Ferris, F.G. (1998). Continuum between sorption and precipitation of Fe (III) on microbial surfaces. **Environmental Science & Technology** 32: 2331-2337.
- Whistler, R.L. and Bemiller, J.N. (1958) . **Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry** 13: 289.
- Wu, D., Zheng, S., Ding, A., Sun, G., and Yang, M. (2015). Performance of a zero valent iron-based anaerobic system in swine wastewater treatment. **Hazardous Materials** 286: 1-6.
- Xiao, X., Fahl, K., and Stein, R. (2013). Biomarker distributions in surface sediments from the Kara and Laptev seas (Arctic Ocean): indicators for organic-carbon sources and sea-ice coverage. **Quaternary Science Reviews** 79: 40-52
- Xie, Y., and Cwiertny, D.M. (2012). Influence of anionic cosolutes and pH on nanoscale zerovalent iron longevity: time scales and mechanisms of reactivity loss toward 1,1,1,2-tetrachloroethane and Cr(VI). **Environmental Science & Technology** 46: 8365-8373.
- Xiu, Z.M., Jin, Z.H., Long, T.L., Mahendra, S., Lowry, G.V., and Alvarez, P.J.J. (2010). Effects of nano-scale zero-valent iron particles on a mixed culture dechlorinating trichloroethylene. **Bioresource Technology** 101: 1141-1146.
- Xu, S.Y., Karthikeyan, O.P., Selvam, A., and Wong, J.W.C. (2014). Microbial community distribution and extracellular enzyme activities in leach bed reactor treating food waste: Effect of different leachate recirculation practices. **Bioresource Technology** 168: 41-48
- Yang, Y., Guo, J., and Hu, Z. (2013). Impact of nano zero valent iron (NZVI) on methanogenic activity and population dynamics in anaerobic digestion. **Water Research** 47: 6790-6800.
- Yu, L., Wensel, P.C., Ma, J., and Chen, S. (2013). Mathematical Modeling in Anaerobic Digestion (AD), **Journal of Bioremediation and Biodegradation** 4: 2155-6199.
- Zhang, Q., He, J., Tian, M., Mao, Z., Tang, L., Zhang, J., and Zhang, H. (2011). Enhancement of methane production from cassava residues by biological pretreatment using a constructed microbial consortium. **Bioresource Technology** 102: 8899-8906

- Zhang, Y.B., Jing, Y.W., Quan, X., Liu, Y.W., Onu, P. (2011). A built-in zero valent iron anaerobic reactor to enhance treatment of azo dye wastewater. **Water Science & Technology** 63: 741-746.
- Zhang, Y., Liu, Y., Jing, Y., Zhao, Z., and Quan, X. (2012). Steady performance of a zero valent iron packed anaerobic reactor for azo dye wastewater treatment under variable influent quality. **Journal of Environmental Sciences** 24: 720-727.
- Zhang, Y., Feng, Y., Yu, Q., Xu, Z., and Quan, X. (2014). Enhanced high-solids anaerobic digestion of waste activated sludge by the addition of scrap iron. **Bioresource Technology** 159: 297-304.
- Zhang, Y., Feng, Y., and Quan, X. (2015). Zero-valent iron enhanced methanogenic activity in anaerobic digestion of waste activated sludge after heat and alkali pretreatment. **Waste Management** 38: 297-302.
- Zhang, W., Wei, Q., Wu, S., Qi, D., Li, W., Zuo, Z., and Dong, R. (2014). Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions. **Applied Energy** 128: 175-183
- Zhen, G., Lu, X., Li, Y., Liu, Y., and Zhao, Y. (2015). Influence of zero valent scrap iron (ZVSI) supply on methane production from waste activated sludge. **Chemical Engineering** 263: 461-470.
- Zhou, X., Wang, Q., and Jiang, G. (2015). Enhancing methane production from waste activated sludge using a novel indigenous iron activated peroxidation pretreatment process. **Bioresource Technology** 182: 267-271.
- Zhu, H., Seto, P., and Parker, W.J. (2014). Enhanced dark fermentative hydrogen production under the effect of zero-valent iron shavings. **International Journal of Hydrogen Energy** 39: 19331-19336.
- Zhu, L., Lin, H.Z., Qi, J.Q., Xu, X.Y., and Qi, H.Y. (2012) Effect of H₂ on reductive transformation of p-CINB in a combined ZVI-anaerobic sludge system. **Water Research** 46: 6291-6299
- Zhu, L., Gao, K., Jin, J., Lin, H., and Xu, X. (2014). Analysis of ZVI corrosion products and their functions in the combined ZVI and anaerobic sludge system. **Environmental Science and Pollution Research** 21: 12747-12756

- Zhu, L., Jin, J., Lin, H., Gao, K., and Xu, X. (2015). Succession of microbial community and enhanced mechanism of a ZVI-based anaerobic granular sludge process treating chloronitrobenzenes wastewater. **Journal of Hazardous Materials** 285: 157-166.
- Zise, W., Chunchun, X., Xis, C., and Ben, X. (2007). The Morphology, Phase Composition and Effect of Corrosion Product on Simulated Archaeological Iron*. **Chinese Journal of Chemical Engineering** 15(3): 433-438





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิ ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมัน
ระเหย ที่มีผลต่อการผลิตไบโอแก๊ส

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหา %TS ระหว่างกากมันสำปะหลัง 100 g ต่อน้ำหมักกรด

ลำดับ	ทดสอบ		จำนวนซ้ำ	น้ำหนักถ้วย	น้ำหนักถ้วย+กาก (50ml)				%moisture	%TS	%VS	TS(mg/l)	TVS(mg/l)
	กาก (g)	น้ำหมักกรด(ml)			ก่อนอบ	นน. ตัวอย่าง	หลังอบ	หลังเผา					
1	100	350	1	114.7746	160.7096	45.9350	117.8597	105.8139	93.28	6.72	89.78	856,998	240,916
			2	113.4262	159.3064	45.8802	116.4909	104.4367	93.32	6.68	89.65	856,310	241,084
			เฉลี่ย	114.1004	160.0080	45.9076	117.1753	105.1253	93.30	6.70	89.72	856,654	241,000
2	100	400	1	102.9481	152.2845	49.3364	106.0775	93.8362	93.66	6.34	88.46	924,140	244,826
			2	120.5436	169.8678	49.3242	123.7513	111.2081	93.50	6.50	89.86	922,330	250,864
			เฉลี่ย	111.7459	161.0762	49.3303	114.9144	102.5222	93.58	6.42	89.22	923,235	247,845
3	100	450	1	69.5349	117.5269	47.9920	72.3623	60.0102	94.11	5.89	82.93	903,292	247,042
			2	70.5324	118.5447	48.0123	73.3664	60.9342	94.10	5.90	83.05	903,566	248,644
			เฉลี่ย	70.0337	118.0358	48.0022	72.8644	60.4722	94.10	5.90	82.99	903,429	247,843
4	100	500	1	62.5831	111.2889	48.7058	65.3327	52.8975	94.35	5.65	80.97	919,124	248,704
			2	72.3541	121.1254	48.7713	75.1489	62.7168	94.27	5.73	83.46	919,530	248,642
			เฉลี่ย	67.4686	116.2072	48.7386	70.2408	57.8072	94.31	5.69	82.30	919,327	248,673
5	100	550	1	62.1549	110.8854	48.7305	64.7056	51.3643	94.77	5.23	79.38	923,596	266,826
			2	80.8621	129.5667	48.7046	83.4544	70.0223	94.68	5.32	83.90	922,246	268,642
			เฉลี่ย	71.5085	120.2261	48.7176	74.0800	60.6933	94.72	5.28	81.93	922,921	267,734

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหา %TS ระหว่างกากมันสำปะหลัง 100 g ต่อน้ำหมักกรด (ต่อ)

ลำดับ	ทดสอบ		จำนวนซ้ำ	น้ำหนักถ้วย	น้ำหนักถ้วย+กาก (50ml)				%moisture	%TS	%VS	TS(mg/l)	TVS(mg/l)
	กาก (g)	น้ำหมักกรด(ml)			ก่อนอบ	นน. ตัวอย่าง	หลังอบ	หลังเผา					
6	100	600	1	66.6575	118.4542	51.7967	69.1953	55.5410	95.10	4.90	80.27	985,178	273,086
			2	80.5621	132.2093	51.6472	83.1059	69.4285	95.07	4.93	83.54	982,068	273,548
			เฉลี่ย	73.6098	125.3318	51.7220	76.1506	62.4848	95.09	4.91	82.05	983,623	273,317
7	100	650	1	78.9357	128.6109	49.6752	81.2796	67.6364	95.28	4.72	83.21	946,626	272,864
			2	90.6451	140.5407	49.8956	93.0875	79.4341	95.10	4.90	85.33	949,064	273,068
			เฉลี่ย	84.7904	134.5758	49.7854	87.1836	73.5353	95.19	4.81	84.35	947,845	272,966
8	100	700	1	113.0483	160.6107	47.5624	115.1856	101.6433	95.51	4.49	88.24	908,502	270,846
			2	114.3251	161.9772	47.6521	116.3059	102.8827	95.84	4.16	88.46	913,426	268,464
			เฉลี่ย	113.6867	161.2940	47.6073	115.7458	102.2630	95.67	4.33	88.35	910,964	269,655
9	100	750	1	124.5643	175.0775	50.5132	126.6144	112.8562	95.94	4.06	89.13	969,262	275,164
			2	110.5774	161.0008	50.4234	112.8684	99.3063	95.46	4.54	87.98	962,648	271,242
			เฉลี่ย	117.5709	168.0392	50.4683	119.7414	106.0813	95.70	4.30	88.59	965,955	273,203
10	100	800	1	90.6421	142.2853	51.6432	92.3382	77.7959	96.72	3.28	84.25	998,942	290,846
			2	78.7532	130.2064	51.4532	80.5613	65.9070	96.49	3.51	81.81	992,902	293,086
			เฉลี่ย	84.6977	136.2459	51.5482	86.4498	71.8515	96.60	3.40	83.11	995,922	291,966

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหา %TS ระหว่างกากมันสำปะหลัง 100 g ต่อน้ำหมักกรด (ต่อ)

ลำดับ	เทส		จำนวน ซ้ำ	น้ำหนัก ถ้วย	น้ำหนักถ้วย+กาก (50ml)				%moisture	%TS	%VS	TS(mg/l)	TVS(mg/l)
	กาก (g)	น้ำหมัก กรด(ml)			ก่อนอบ	นน. ตัวอย่าง	หลังอบ	หลังเผา					
11	100	850	1	89.6412	141.2955	51.6543	91.2641	75.7218	96.86	3.14	82.97	1,000,628	310,846
			2	90.3421	142.0963	51.7542	91.9539	76.2996	96.89	3.11	82.98	1,002,848	313,086
			เฉลี่ย	89.9917	141.6959	51.7043	91.6090	76.0107	96.87	3.13	82.97	1,001,738	311,966
12	100	900	1	104.5223	154.1764	49.6541	105.7312	90.6081	97.57	2.43	85.70	968,904	302,462
			2	60.5231	109.9803	49.4572	61.6191	46.4759	97.78	2.22	75.42	967,224	302,864
			เฉลี่ย	82.5227	132.0784	49.5557	83.6752	68.5420	97.67	2.33	81.91	968,064	302,663
13	100	950	1	90.5234	141.1775	50.6541	91.6344	75.9104	97.81	2.19	82.84	990,862	314,480
			2	89.5723	140.1333	50.5610	90.5913	74.0490	97.98	2.02	81.74	990,840	330,846
			เฉลี่ย	90.0479	140.6554	50.6076	91.1129	74.9797	97.90	2.10	82.29	990,851	322,663
14	100	-	1	70.4522	170.7177	100.2655	93.9340	75.4106	76.58	23.42	80.28	1,535,674	370,468
			2	65.6543	166.1776	100.5233	89.8134	70.7702	75.97	24.03	78.80	1,527,284	380,864
			เฉลี่ย	68.0533	168.4477	100.3944	91.8737	73.0904	76.27	23.73	79.56	1,531,479	375,666



รูปที่ ก. 1 การทดลองแบบ Batch เพื่อศึกษา pH และ อุณหภูมิเพื่อเพิ่มกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อการเกิดไบโอแก๊ส

ตารางที่ ก.2 ผลของการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ในรูปของน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่าย

สภาวะ	pH	อุณหภูมิ	เวลาทำปฏิกิริยา	reducing sugar mg C ₆ H ₁₂ O ₆ /g TS	VFA mg CH ₃ COOH/g TS
1	1	100	30	564.46	27.28
2	2	100	30	506.04	12.79
3	3	100	30	182.39	7.79
4	4	100	30	6.09	6.19
5	5	100	30	8.68	7.22
6	6	100	30	19.79	6.74
7	7	100	30	24.70	7.74
8	8	100	30	30.39	7.94
9	9	100	30	62.63	7.87
10	10	100	30	110.01	9.17
11	11	100	30	111.02	8.37
12	12	100	30	112.98	13.24
13	13	100	30	273.44	23.35
Control	4.2	18.9	-	4.38	5.82

ตารางที่ ก.3 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก

สภาวะ	pH	Temp	COD (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA (mg/l)	Reducing suger(mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)	VFA/Alk
pH1	7.03	25.6	44,000	1462.5	327.28	664.46	674,138	276,432	0.22
pH2	7.05	25.6	44,500	1400	312.79	606.04	674,362	274,673	0.22
pH3	7.02	26.7	44,800	1487.5	127.79	282.39	643,251	267,548	0.09
pH4	7.05	26.8	44,400	1387.5	126.19	206.09	637,244	279,542	0.09
pH5	7.05	26.5	44,200	1412.5	127.22	208.68	654,812	278,429	0.09
pH6	7.02	27	44,600	1437.5	126.74	219.79	654,123	269,324	0.09
pH7	7.03	27.1	45,600	1487.5	127.74	224.70	664,381	269,834	0.09
pH8	7.04	25.7	45,200	1637.5	127.94	230.39	643,129	270,525	0.08
pH9	7.04	26.3	45,200	1662.5	127.87	262.63	654,163	270,543	0.08
pH10	7.03	27.1	45,400	1642.5	129.17	310.01	654,432	269,246	0.08
pH11	7.03	26.6	44,400	1727.5	128.37	311.02	665,472	268,151	0.07
pH12	7.03	26.8	45,000	1632.5	213.24	312.98	652,317	275,497	0.13
pH13	7.04	27	45,200	1652.5	223.35	373.44	657,332	273,554	0.14
Control	7.03	27	45,200	1402.5	25.82	204.38	650,248	267,523	0.02



ตารางที่ ก.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดภายหลังจากหมักที่เวลา 60 วัน

สภาวะ	pH	Temp	COD (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA (mg/l)	Reducing suger(mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)	VFA/Alk
pH1	5.34	24.4	25,000	962.5	529.87	375.2	324,716	207,543	0.55
pH2	5.75	24.5	20,400	900.0	576.62	342.0	312,048	201,132	0.64
pH3	6.45	25.4	21,600	987.5	561.04	153.0	295,734	197,658	0.57
pH4	6.5	25.4	19,800	887.5	607.79	114.0	285,673	185,748	0.68
pH5	7.13	25.6	14,800	1262.5	592.21	120.0	287,543	176,443	0.47
pH6	7.02	26.1	13,000	1290	818.18	113.9	275,438	154,352	0.63
pH7	7.03	26.1	13,000	1485	825.97	118.8	250,389	143,254	0.56
pH8	7.03	25.6	11,400	1635	825.97	117.1	220,583	140,654	0.51
pH9	7.02	20.2	11,800	1660	888.31	120.7	196,574	135,439	0.54
pH10	7.02	20.1	10,450	1640	584.42	109.6	186,432	123,271	0.36
pH11	7.02	19.4	12,600	1725	615.58	166.3	204,343	129,564	0.36
pH12	7.04	19.6	13,800	1625	693.51	156.4	210,539	136,421	0.43
pH13	6.88	21.0	13,200	1645	732.47	168.5	219,783	137,623	0.45
Control	6.98	25.1	20,300	1420	420.78	100.0	220,638	145,439	0.30



ตารางที่ ก.5 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
0	300	190	230	250	250	300	400	400	430	600	1,050	675	680	665
1	610	390	460	500	525	620	805	810	880	1,250	2,230	1,370	1,360	1,280
2	925	590	670	750	800	940	1,210	1,220	1,330	1,900	3,330	2,100	2,010	1,880
3	1,245	790	880	1,000	1,050	1,280	1,625	1,635	1,780	2,600	4,480	2,820	2,710	2,500
4	1,565	980	1,070	1,250	1,400	1,620	2,065	2,055	2,230	3,315	5,600	3,520	3,435	3,000
5	1,885	1,180	1,270	1,500	1,750	1,960	2,505	2,475	2,680	4,040	6,740	4,220	4,035	3,600
6	2,210	1,370	1,460	1,750	2,050	2,300	2,945	2,900	3,130	4,785	7,910	4,965	4,755	4,000
7	2,535	1,570	1,675	1,990	2,400	2,640	3,390	3,350	3,580	5,545	9,070	5,775	5,475	4,200
8	2,885	1,750	1,890	2,240	2,750	2,990	3,835	3,820	4,030	6,390	10,220	6,595	6,295	4,500
9	3,235	1,930	2,100	2,495	3,100	3,340	4,280	4,290	4,480	7,240	11,390	7,445	7,145	4,820
10	3,585	2,120	2,310	2,750	3,450	3,690	4,720	4,760	4,930	8,040	12,500	8,245	7,945	5,150
11	3,935	2,310	2,520	3,010	3,830	4,090	5,160	5,230	5,380	8,815	13,610	8,995	8,695	5,550
12	4,280	2,560	2,770	3,270	4,210	4,490	5,600	5,700	5,830	9,520	14,710	9,695	9,375	5,750
13	4,610	2,810	3,020	3,540	4,590	4,890	6,040	6,170	6,280	10,320	15,810	10,440	10,075	5,950
14	4,940	3,010	3,270	3,810	4,970	5,290	6,485	6,640	6,735	11,125	16,915	11,190	10,825	6,150
15	5,285	3,210	3,520	4,080	5,350	5,690	6,915	7,115	7,185	11,875	18,020	11,940	11,545	6,300

ตารางที่ ก.5 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
16	5,625	3,420	3,765	4,350	5,730	6,090	7,355	7,590	7,735	12,630	19,125	12,695	12,285	6,580
17	5,965	3,630	4,005	4,620	6,110	6,490	7,795	8,065	8,285	13,430	20,225	13,445	13,010	6,830
18	6,295	3,840	4,245	4,895	6,495	6,890	8,235	8,535	8,835	14,230	21,325	14,195	13,735	7,080
19	6,605	4,050	4,475	5,170	6,875	7,295	8,675	9,005	9,390	15,015	22,430	14,950	14,460	7,350
20	6,905	4,250	4,675	5,445	7,255	7,700	9,120	9,475	9,945	15,715	23,545	15,670	15,180	7,680
21	7,205	4,450	4,875	5,720	7,635	8,105	9,565	9,945	10,500	16,440	24,670	16,390	15,830	7,910
22	7,505	4,650	5,080	5,990	8,015	8,510	10,010	10,415	11,055	17,165	25,795	17,110	16,480	8,110
23	7,805	4,850	5,285	6,265	8,405	8,915	10,455	10,885	11,610	17,885	26,915	17,830	17,200	8,310
24	8,105	5,055	5,490	6,540	8,785	9,310	10,895	11,355	12,165	18,530	28,035	18,450	17,820	8,510
25	8,405	5,255	5,695	6,815	9,170	9,705	11,335	11,825	12,715	19,150	29,155	19,075	18,440	8,710
26	8,705	5,460	5,905	7,090	9,555	10,100	11,770	12,275	13,265	19,770	30,235	19,700	19,060	8,910
27	9,005	5,660	6,105	7,360	9,935	10,490	12,205	12,730	13,815	20,370	31,315	20,320	19,680	9,090
28	9,305	5,860	6,305	7,630	10,310	10,880	12,635	13,180	14,265	20,975	32,365	20,970	20,280	9,270
29	9,605	6,055	6,505	7,880	10,670	11,270	13,065	13,610	14,720	21,580	33,380	21,620	20,880	9,450
30	9,905	6,235	6,700	8,095	11,000	11,660	13,495	14,035	15,165	22,130	34,385	22,270	21,480	9,630
31	10,205	6,355	6,840	8,270	11,320	11,960	13,930	14,480	15,620	22,685	35,140	22,825	21,990	9,795

ตารางที่ ก.5 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
32	10,510	6,470	6,980	8,440	11,645	12,245	14,280	14,850	16,065	23,200	35,695	23,380	22,185	9,965
33	10,825	6,520	7,125	8,595	11,865	12,515	14,625	15,215	16,475	23,695	36,210	23,800	22,305	10,115
34	11,140	6,570	7,240	8,700	12,075	12,710	14,955	15,545	16,820	24,000	36,705	24,205	22,410	10,265
35	11,450	6,620	7,355	8,780	12,290	12,920	15,245	15,885	17,175	24,295	37,110	24,560	22,515	10,390
36	11,760	6,660	7,460	8,840	12,495	13,125	15,460	16,195	17,475	24,595	37,465	24,905	22,595	10,495
37	12,060	6,700	7,510	8,905	12,695	13,315	15,665	16,500	17,765	24,900	37,780	25,245	22,680	10,590
38	12,365	6,745	7,565	8,955	12,850	13,470	15,865	16,800	18,030	25,200	38,085	25,545	22,750	10,645
39	12,615	6,785	7,625	8,995	13,000	13,620	16,030	17,085	18,285	25,455	38,385	25,790	22,815	10,700
40	12,850	6,815	7,665	9,035	13,100	13,725	16,145	17,340	18,570	25,675	38,640	26,020	22,880	10,775
41	13,070	6,860	7,710	9,085	13,155	13,820	16,240	17,555	18,820	25,865	38,860	26,225	22,940	10,830
42	13,275	6,900	7,740	9,120	13,190	13,885	16,305	17,745	19,035	26,020	39,050	26,420	22,995	10,875
43	13,477	6,935	7,775	9,155	13,230	13,935	16,370	17,895	19,220	26,170	39,205	26,575	23,045	10,910
44	13,672	6,960	7,805	9,180	13,270	13,980	16,425	18,050	19,375	26,305	39,360	26,725	23,090	10,945
45	13,822	6,985	7,835	9,200	13,305	14,015	16,475	18,125	19,490	26,450	39,505	26,825	23,125	10,970
46	13,962	7,005	7,860	9,220	13,340	14,045	16,525	18,220	19,595	26,555	39,610	26,920	23,150	10,995
47	14,082	7,025	7,885	9,235	13,370	14,075	16,570	18,270	19,670	26,620	39,675	26,965	23,165	11,010

ตารางที่ ก.5 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
48	14,192	7,040	7,905	9,250	13,390	14,100	16,610	18,315	19,720	26,670	39,725	27,040	23,180	11,025
49	14,292	7,050	7,920	9,260	13,410	14,120	16,645	18,355	19,765	26,720	39,775	27,075	23,190	11,030
50	14,342	7,060	7,935	9,270	13,425	14,135	16,670	18,395	19,805	26,765	39,820	27,100	23,195	11,035
51	14,382	7,065	7,945	9,280	13,435	14,145	16,690	18,430	19,830	26,795	39,850	27,120	23,200	11,040
52	14,402	7,070	7,950	9,285	13,445	14,155	16,700	18,460	19,860	26,830	39,885	27,130	23,200	11,040
53	14,412	7,070	7,955	9,290	13,450	14,160	16,705	18,485	19,880	26,855	39,910	27,140	23,200	11,040
54	14,412	7,070	7,955	9,290	13,450	14,160	16,705	18,495	19,895	26,880	39,935	27,145	23,200	11,040
55	14,412	7,070	7,955	9,290	13,450	14,160	16,705	18,500	19,900	26,885	39,940	27,145	23,200	11,040
56	14,412	7,070	7,955	9,290	13,450	14,160	16,705	18,500	19,900	26,885	39,940	27,145	23,200	11,040
57	14,412	7,070	7,955	9,290	13,450	14,160	16,705	18,500	19,900	26,885	39,940	27,145	23,200	11,040
58	14,412	7,070	7,955	9,290	13,450	14,160	16,705	18,500	19,900	26,885	39,940	27,145	23,200	11,040
59	14,412	7,070	7,955	9,290	13,450	14,160	16,705	18,500	19,900	26,885	39,940	27,145	23,200	11,040
60	14,412	7,070	7,955	9,290	13,450	14,160	16,705	18,500	19,900	26,885	39,940	27,145	23,200	11,040

ตารางที่ ก.6 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
0	0.016	0.010	0.012	0.013	0.013	0.016	0.021	0.021	0.023	0.032	0.056	0.036	0.036	0.035
1	0.032	0.021	0.024	0.026	0.028	0.033	0.043	0.043	0.047	0.066	0.118	0.073	0.072	0.068
2	0.049	0.031	0.035	0.040	0.042	0.050	0.064	0.065	0.070	0.101	0.176	0.111	0.106	0.100
3	0.066	0.042	0.047	0.053	0.056	0.068	0.086	0.087	0.094	0.138	0.237	0.149	0.144	0.132
4	0.083	0.052	0.057	0.066	0.074	0.086	0.109	0.109	0.118	0.176	0.297	0.186	0.182	0.159
5	0.100	0.063	0.067	0.079	0.093	0.104	0.133	0.131	0.142	0.214	0.357	0.224	0.214	0.191
6	0.117	0.073	0.077	0.093	0.109	0.122	0.156	0.154	0.166	0.253	0.419	0.263	0.252	0.212
7	0.134	0.083	0.089	0.105	0.127	0.140	0.180	0.177	0.190	0.294	0.480	0.306	0.290	0.222
8	0.153	0.093	0.100	0.119	0.146	0.158	0.203	0.202	0.213	0.338	0.541	0.349	0.333	0.238
9	0.171	0.102	0.111	0.132	0.164	0.177	0.227	0.227	0.237	0.383	0.603	0.394	0.378	0.255
10	0.190	0.112	0.122	0.146	0.183	0.195	0.250	0.252	0.261	0.426	0.662	0.437	0.421	0.273
11	0.208	0.122	0.133	0.159	0.203	0.217	0.273	0.277	0.285	0.467	0.721	0.476	0.461	0.294
12	0.227	0.136	0.147	0.173	0.223	0.238	0.297	0.302	0.309	0.504	0.779	0.514	0.497	0.305
13	0.244	0.149	0.160	0.188	0.243	0.259	0.320	0.327	0.333	0.547	0.837	0.553	0.534	0.315
14	0.262	0.159	0.173	0.202	0.263	0.280	0.343	0.352	0.357	0.589	0.896	0.593	0.573	0.326
15	0.280	0.170	0.186	0.216	0.283	0.301	0.366	0.377	0.381	0.629	0.954	0.632	0.611	0.334

ตารางที่ ก.6 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
16	0.298	0.181	0.199	0.230	0.303	0.323	0.390	0.402	0.410	0.669	1.013	0.672	0.651	0.349
17	0.316	0.192	0.212	0.245	0.324	0.344	0.413	0.427	0.439	0.711	1.071	0.712	0.689	0.362
18	0.333	0.203	0.225	0.259	0.344	0.365	0.436	0.452	0.468	0.754	1.130	0.752	0.727	0.375
19	0.350	0.215	0.237	0.274	0.364	0.386	0.459	0.477	0.497	0.795	1.188	0.792	0.766	0.389
20	0.366	0.225	0.248	0.288	0.384	0.408	0.483	0.502	0.527	0.832	1.247	0.830	0.804	0.407
21	0.382	0.236	0.258	0.303	0.404	0.429	0.507	0.527	0.556	0.871	1.307	0.868	0.838	0.419
22	0.398	0.246	0.269	0.317	0.425	0.451	0.530	0.552	0.586	0.909	1.366	0.906	0.873	0.430
23	0.413	0.257	0.280	0.332	0.445	0.472	0.554	0.577	0.615	0.947	1.426	0.944	0.911	0.440
24	0.429	0.268	0.291	0.346	0.465	0.493	0.577	0.601	0.644	0.981	1.485	0.977	0.944	0.451
25	0.445	0.278	0.302	0.361	0.486	0.514	0.600	0.626	0.673	1.014	1.544	1.010	0.977	0.461
26	0.461	0.289	0.313	0.376	0.506	0.535	0.623	0.650	0.703	1.047	1.601	1.043	1.010	0.472
27	0.477	0.300	0.323	0.390	0.526	0.556	0.646	0.674	0.732	1.079	1.659	1.076	1.042	0.481
28	0.493	0.310	0.334	0.404	0.546	0.576	0.669	0.698	0.756	1.111	1.714	1.111	1.074	0.491
29	0.509	0.321	0.345	0.417	0.565	0.597	0.692	0.721	0.780	1.143	1.768	1.145	1.106	0.501
30	0.525	0.330	0.355	0.429	0.583	0.618	0.715	0.743	0.803	1.172	1.821	1.180	1.138	0.510
31	0.541	0.337	0.362	0.438	0.600	0.633	0.738	0.767	0.827	1.202	1.861	1.209	1.165	0.519

ตารางที่ ก.6 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
32	0.557	0.343	0.370	0.447	0.617	0.649	0.756	0.787	0.851	1.229	1.891	1.238	1.175	0.528
33	0.573	0.345	0.377	0.455	0.628	0.663	0.775	0.806	0.873	1.255	1.918	1.261	1.181	0.536
34	0.590	0.348	0.383	0.461	0.640	0.673	0.792	0.823	0.891	1.271	1.944	1.282	1.187	0.544
35	0.606	0.351	0.390	0.465	0.651	0.684	0.807	0.841	0.910	1.287	1.966	1.301	1.193	0.550
36	0.623	0.353	0.395	0.468	0.662	0.695	0.819	0.858	0.926	1.303	1.984	1.319	1.197	0.556
37	0.639	0.355	0.398	0.472	0.672	0.705	0.830	0.874	0.941	1.319	2.001	1.337	1.201	0.561
38	0.655	0.357	0.401	0.474	0.681	0.713	0.840	0.890	0.955	1.335	2.017	1.353	1.205	0.564
39	0.668	0.359	0.404	0.476	0.689	0.721	0.849	0.905	0.968	1.348	2.033	1.366	1.208	0.567
40	0.681	0.361	0.406	0.479	0.694	0.727	0.855	0.918	0.984	1.360	2.047	1.378	1.212	0.571
41	0.692	0.363	0.408	0.481	0.697	0.732	0.860	0.930	0.997	1.370	2.058	1.389	1.215	0.574
42	0.703	0.365	0.410	0.483	0.699	0.735	0.864	0.940	1.008	1.378	2.068	1.399	1.218	0.576
43	0.714	0.367	0.412	0.485	0.701	0.738	0.867	0.948	1.018	1.386	2.077	1.408	1.221	0.578
44	0.724	0.369	0.413	0.486	0.703	0.740	0.870	0.956	1.026	1.393	2.085	1.416	1.223	0.580
45	0.732	0.370	0.415	0.487	0.705	0.742	0.873	0.960	1.032	1.401	2.092	1.421	1.225	0.581
46	0.740	0.371	0.416	0.488	0.707	0.744	0.875	0.965	1.038	1.407	2.098	1.426	1.226	0.582
47	0.746	0.372	0.418	0.489	0.708	0.745	0.878	0.968	1.042	1.410	2.101	1.428	1.227	0.583

ตารางที่ ก.6 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m^3/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
48	0.752	0.373	0.419	0.490	0.709	0.747	0.880	0.970	1.044	1.413	2.104	1.432	1.228	0.584
49	0.757	0.373	0.419	0.490	0.710	0.748	0.882	0.972	1.047	1.415	2.107	1.434	1.228	0.584
50	0.760	0.374	0.420	0.491	0.711	0.749	0.883	0.974	1.049	1.418	2.109	1.435	1.229	0.584
51	0.762	0.374	0.421	0.492	0.712	0.749	0.884	0.976	1.050	1.419	2.111	1.436	1.229	0.585
52	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.978	1.052	1.421	2.113	1.437	1.229	0.585
53	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.979	1.053	1.422	2.114	1.438	1.229	0.585
54	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.980	1.054	1.424	2.115	1.438	1.229	0.585
55	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.980	1.054	1.424	2.115	1.438	1.229	0.585
56	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.980	1.054	1.424	2.115	1.438	1.229	0.585
57	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.980	1.054	1.424	2.115	1.438	1.229	0.585
58	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.980	1.054	1.424	2.115	1.438	1.229	0.585
59	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.980	1.054	1.424	2.115	1.438	1.229	0.585
60	0.763	0.374	0.421	0.492	0.712	0.750	0.885	0.980	1.054	1.424	2.115	1.438	1.229	0.585

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิต ไบโอดีเอส
แตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Cont.	pH1	118.38710*	14.95956	.000	67.9204	168.8538
	pH2	103.38710*	14.95956	.000	52.9204	153.8538
	pH3	58.38710*	14.95956	.008	7.9204	108.8538
	pH4	-35.32258	14.95956	.511	-85.7893	15.1442
	pH5	-56.61290*	14.95956	.013	-107.0796	-6.1462
	pH6	-115.80645*	14.95956	.000	-166.2732	-65.3397
	pH7	-133.22581*	14.95956	.000	-183.6925	-82.7591
	pH8	-169.67742*	14.95956	.000	-220.1442	-119.2107
	pH9	-394.35484*	14.95956	.000	-444.8216	-343.8881
	pH10	-789.67742*	14.95956	.000	-840.1442	-739.2107
	pH11	-398.87097*	14.95956	.000	-449.3377	-348.4042
	pH12	-373.38710*	14.95956	.000	-423.8538	-322.9204
	pH13	8.87097	14.95956	1.000	-41.5958	59.3377
pH1	Cont.	-118.38710*	14.95956	.000	-168.8538	-67.9204
	pH2	-15.00000	14.95956	.999	-65.4667	35.4667
	pH3	-60.00000*	14.95956	.005	-110.4667	-9.5333
	pH4	-153.70968*	14.95956	.000	-204.1764	-103.2429
	pH5	-175.00000*	14.95956	.000	-225.4667	-124.5333
	pH6	-234.19355*	14.95956	.000	-284.6603	-183.7268
	pH7	-251.61290*	14.95956	.000	-302.0796	-201.1462
	pH8	-288.06452*	14.95956	.000	-338.5313	-237.5978
	pH9	-512.74194*	14.95956	.000	-563.2087	-462.2752
	pH10	-908.06452*	14.95956	.000	-958.5313	-857.5978
	pH11	-517.25806*	14.95956	.000	-567.7248	-466.7913
	pH12	-491.77419*	14.95956	.000	-542.2409	-441.3075
	pH13	-109.51613*	14.95956	.000	-159.9829	-59.0494

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิต ไบโอดีเอส
แตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)
(ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH2	Cont.	-103.38710*	14.95956	.000	-153.8538	-52.9204
	pH1	15.00000	14.95956	.999	-35.4667	65.4667
	pH3	-45.00000	14.95956	.139	-95.4667	5.4667
	pH4	-138.70968*	14.95956	.000	-189.1764	-88.2429
	pH5	-160.00000*	14.95956	.000	-210.4667	-109.5333
	pH6	-219.19355*	14.95956	.000	-269.6603	-168.7268
	pH7	-236.61290*	14.95956	.000	-287.0796	-186.1462
	pH8	-273.06452*	14.95956	.000	-323.5313	-222.5978
	pH9	-497.74194*	14.95956	.000	-548.2087	-447.2752
	pH10	-893.06452*	14.95956	.000	-943.5313	-842.5978
	pH11	-502.25806*	14.95956	.000	-552.7248	-451.7913
	pH12	-476.77419*	14.95956	.000	-527.2409	-426.3075
	pH13	-94.51613*	14.95956	.000	-144.9829	-44.0494
pH3	Cont.	-58.38710*	14.95956	.008	-108.8538	-7.9204
	pH1	60.00000*	14.95956	.005	9.5333	110.4667
	pH2	45.00000	14.95956	.139	-5.4667	95.4667
	pH4	-93.70968*	14.95956	.000	-144.1764	-43.2429
	pH5	-115.00000*	14.95956	.000	-165.4667	-64.5333
	pH6	-174.19355*	14.95956	.000	-224.6603	-123.7268
	pH7	-191.61290*	14.95956	.000	-242.0796	-141.1462
	pH8	-228.06452*	14.95956	.000	-278.5313	-177.5978
	pH9	-452.74194*	14.95956	.000	-503.2087	-402.2752
	pH10	-848.06452*	14.95956	.000	-898.5313	-797.5978
	pH11	-457.25806*	14.95956	.000	-507.7248	-406.7913
	pH12	-431.77419*	14.95956	.000	-482.2409	-381.3075
	pH13	-49.51613	14.95956	.061	-99.9829	.9506

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิต ไบโอดีเอส
แตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)
(ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH4	Cont.	35.32258	14.95956	.511	-15.1442	85.7893
	pH1	153.70968*	14.95956	.000	103.2429	204.1764
	pH2	138.70968*	14.95956	.000	88.2429	189.1764
	pH3	93.70968*	14.95956	.000	43.2429	144.1764
	pH5	-21.29032	14.95956	.979	-71.7571	29.1764
	pH6	-80.48387*	14.95956	.000	-130.9506	-30.0171
	pH7	-97.90323*	14.95956	.000	-148.3700	-47.4365
	pH8	-134.35484*	14.95956	.000	-184.8216	-83.8881
	pH9	-359.03226*	14.95956	.000	-409.4990	-308.5655
	pH10	-754.35484*	14.95956	.000	-804.8216	-703.8881
	pH11	-363.54839*	14.95956	.000	-414.0151	-313.0817
	pH12	-338.06452*	14.95956	.000	-388.5313	-287.5978
	pH13	44.19355	14.95956	.160	-6.2732	94.6603
pH5	Cont.	56.61290*	14.95956	.013	6.1462	107.0796
	pH1	175.00000*	14.95956	.000	124.5333	225.4667
	pH2	160.00000*	14.95956	.000	109.5333	210.4667
	pH3	115.00000*	14.95956	.000	64.5333	165.4667
	pH4	21.29032	14.95956	.979	-29.1764	71.7571
	pH6	-59.19355*	14.95956	.007	-109.6603	-8.7268
	pH7	-76.61290*	14.95956	.000	-127.0796	-26.1462
	pH8	-113.06452*	14.95956	.000	-163.5313	-62.5978
	pH9	-337.74194*	14.95956	.000	-388.2087	-287.2752
	pH10	-733.06452*	14.95956	.000	-783.5313	-682.5978
	pH11	-342.25806*	14.95956	.000	-392.7248	-291.7913
	pH12	-316.77419*	14.95956	.000	-367.2409	-266.3075
	pH13	65.48387*	14.95956	.001	15.0171	115.9506

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิต ไบโอดีเอส
แตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)
(ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH6	Cont.	115.80645*	14.95956	.000	65.3397	166.2732
	pH1	234.19355*	14.95956	.000	183.7268	284.6603
	pH2	219.19355*	14.95956	.000	168.7268	269.6603
	pH3	174.19355*	14.95956	.000	123.7268	224.6603
	pH4	80.48387*	14.95956	.000	30.0171	130.9506
	pH5	59.19355*	14.95956	.007	8.7268	109.6603
	pH7	-17.41935	14.95956	.997	-67.8861	33.0474
	pH8	-53.87097*	14.95956	.024	-104.3377	-3.4042
	pH9	-278.54839*	14.95956	.000	-329.0151	-228.0817
	pH10	-673.87097*	14.95956	.000	-724.3377	-623.4042
	pH11	-283.06452*	14.95956	.000	-333.5313	-232.5978
	pH12	-257.58065*	14.95956	.000	-308.0474	-207.1139
	pH13	124.67742*	14.95956	.000	74.2107	175.1442
pH7	Cont.	133.22581*	14.95956	.000	82.7591	183.6925
	pH1	251.61290*	14.95956	.000	201.1462	302.0796
	pH2	236.61290*	14.95956	.000	186.1462	287.0796
	pH3	191.61290*	14.95956	.000	141.1462	242.0796
	pH4	97.90323*	14.95956	.000	47.4365	148.3700
	pH5	76.61290*	14.95956	.000	26.1462	127.0796
	pH6	17.41935	14.95956	.997	-33.0474	67.8861
	pH8	-36.45161	14.95956	.455	-86.9183	14.0151
	pH9	-261.12903*	14.95956	.000	-311.5958	-210.6623
	pH10	-656.45161*	14.95956	.000	-706.9183	-605.9849
	pH11	-265.64516*	14.95956	.000	-316.1119	-215.1784
	pH12	-240.16129*	14.95956	.000	-290.6280	-189.6946
	pH13	142.09677*	14.95956	.000	91.6300	192.5635

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิต ไบโอดีเอส
แตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)
(ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH8	Cont.	169.67742*	14.95956	.000	119.2107	220.1442
	pH1	288.06452*	14.95956	.000	237.5978	338.5313
	pH2	273.06452*	14.95956	.000	222.5978	323.5313
	pH3	228.06452*	14.95956	.000	177.5978	278.5313
	pH4	134.35484*	14.95956	.000	83.8881	184.8216
	pH5	113.06452*	14.95956	.000	62.5978	163.5313
	pH6	53.87097*	14.95956	.024	3.4042	104.3377
	pH7	36.45161	14.95956	.455	-14.0151	86.9183
	pH9	-224.67742*	14.95956	.000	-275.1442	-174.2107
	pH10	-620.00000*	14.95956	.000	-670.4667	-569.5333
	pH11	-229.19355*	14.95956	.000	-279.6603	-178.7268
	pH12	-203.70968*	14.95956	.000	-254.1764	-153.2429
	pH13	178.54839*	14.95956	.000	128.0817	229.0151
pH9	Cont.	394.35484*	14.95956	.000	343.8881	444.8216
	pH1	512.74194*	14.95956	.000	462.2752	563.2087
	pH2	497.74194*	14.95956	.000	447.2752	548.2087
	pH3	452.74194*	14.95956	.000	402.2752	503.2087
	pH4	359.03226*	14.95956	.000	308.5655	409.4990
	pH5	337.74194*	14.95956	.000	287.2752	388.2087
	pH6	278.54839*	14.95956	.000	228.0817	329.0151
	pH7	261.12903*	14.95956	.000	210.6623	311.5958
	pH8	224.67742*	14.95956	.000	174.2107	275.1442
	pH10	-395.32258*	14.95956	.000	-445.7893	-344.8558
	pH11	-4.51613	14.95956	1.000	-54.9829	45.9506
	pH12	20.96774	14.95956	.981	-29.4990	71.4345
	pH13	403.22581*	14.95956	.000	352.7591	453.6925

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิต ไบโอดีเอส
แตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)
(ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH10	Cont.	789.67742*	14.95956	.000	739.2107	840.1442
	pH1	908.06452*	14.95956	.000	857.5978	958.5313
	pH2	893.06452*	14.95956	.000	842.5978	943.5313
	pH3	848.06452*	14.95956	.000	797.5978	898.5313
	pH4	754.35484*	14.95956	.000	703.8881	804.8216
	pH5	733.06452*	14.95956	.000	682.5978	783.5313
	pH6	673.87097*	14.95956	.000	623.4042	724.3377
	pH7	656.45161*	14.95956	.000	605.9849	706.9183
	pH8	620.00000*	14.95956	.000	569.5333	670.4667
	pH9	395.32258*	14.95956	.000	344.8558	445.7893
	pH11	390.80645*	14.95956	.000	340.3397	441.2732
	pH12	416.29032*	14.95956	.000	365.8236	466.7571
	pH13	798.54839*	14.95956	.000	748.0817	849.0151
pH11	Cont.	398.87097*	14.95956	.000	348.4042	449.3377
	pH1	517.25806*	14.95956	.000	466.7913	567.7248
	pH2	502.25806*	14.95956	.000	451.7913	552.7248
	pH3	457.25806*	14.95956	.000	406.7913	507.7248
	pH4	363.54839*	14.95956	.000	313.0817	414.0151
	pH5	342.25806*	14.95956	.000	291.7913	392.7248
	pH6	283.06452*	14.95956	.000	232.5978	333.5313
	pH7	265.64516*	14.95956	.000	215.1784	316.1119
	pH8	229.19355*	14.95956	.000	178.7268	279.6603
	pH9	4.51613	14.95956	1.000	-45.9506	54.9829
	pH10	-390.80645*	14.95956	.000	-441.2732	-340.3397
	pH12	25.48387	14.95956	.914	-24.9829	75.9506
	pH13	407.74194*	14.95956	.000	357.2752	458.2087

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH คู่ที่มีการผลิต ไบโอดีเอส
แตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)
(ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH12	Cont.	373.38710*	14.95956	.000	322.9204	423.8538
	pH1	491.77419*	14.95956	.000	441.3075	542.2409
	pH2	476.77419*	14.95956	.000	426.3075	527.2409
	pH3	431.77419*	14.95956	.000	381.3075	482.2409
	pH4	338.06452*	14.95956	.000	287.5978	388.5313
	pH5	316.77419*	14.95956	.000	266.3075	367.2409
	pH6	257.58065*	14.95956	.000	207.1139	308.0474
	pH7	240.16129*	14.95956	.000	189.6946	290.6280
	pH8	203.70968*	14.95956	.000	153.2429	254.1764
	pH9	-20.96774	14.95956	.981	-71.4345	29.4990
	pH10	-416.29032*	14.95956	.000	-466.7571	-365.8236
	pH11	-25.48387	14.95956	.914	-75.9506	24.9829
	pH13	382.25806*	14.95956	.000	331.7913	432.7248
pH13	Cont.	-8.87097	14.95956	1.000	-59.3377	41.5958
	pH1	109.51613*	14.95956	.000	59.0494	159.9829
	pH2	94.51613*	14.95956	.000	44.0494	144.9829
	pH3	49.51613	14.95956	.061	-.9506	99.9829
	pH4	-44.19355	14.95956	.160	-94.6603	6.2732
	pH5	-65.48387*	14.95956	.001	-115.9506	-15.0171
	pH6	-124.67742*	14.95956	.000	-175.1442	-74.2107
	pH7	-142.09677*	14.95956	.000	-192.5635	-91.6300
	pH8	-178.54839*	14.95956	.000	-229.0151	-128.0817
	pH9	-403.22581*	14.95956	.000	-453.6925	-352.7591
	pH10	-798.54839*	14.95956	.000	-849.0151	-748.0817
	pH11	-407.74194*	14.95956	.000	-458.2087	-357.2752
	pH12	-382.25806*	14.95956	.000	-432.7248	-331.7913

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบความเหมือนกันของชุดข้อมูล

pH	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH1	61	201.13								
pH2	61	216.13	216.13							
pH3	61		261.13	261.13						
pH13	61			310.65	310.65					
Cont.	61				319.52					
pH4	61				354.84	354.84				
pH5	61					376.13				
pH6	61						435.32			
pH7	61						452.74	452.74		
pH8	61							489.19		
pH12	61								692.90	
pH9	61								713.87	
pH11	61								718.39	
pH10	61									1109.19
Significant		.999	.139	.061	.160	.979	.997	.455	.914	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.										
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 61,000.										



ภาคผนวก ข

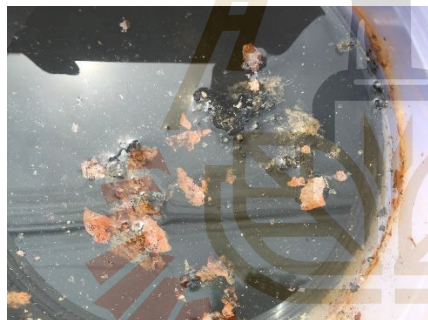
ศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์

100 g/kg TVS

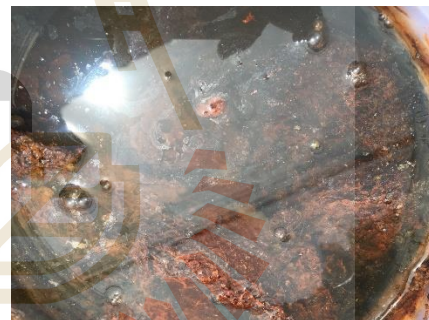
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 การทดลองแบบ Batch เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊สเมื่อใช้เหล็ก
ประจุศูนย์ 100 g/kg TVS



(ก) pH 1- pH 4



(ข) pH 5- pH 8



(ค) pH 9- pH 11



(ง) pH 12 - pH 13

รูปที่ ข.2 ลักษณะเหล็กประจุศูนย์ภายหลังการหมักกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตไบโอแก๊สที่
ระยะเวลา 60 วัน

ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดก่อนกระบวนการหมัก

สภาวะ	pH	Temp	COD (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA (mg/l)	Reducing suger(mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)	VFA/Alk
pH1	7.33	25.6	44,000	900	63.12	685.2	681,346	260,320	0.07
pH2	7.34	25.6	48,000	925	155.84	672.0	714,311	283,571	0.17
pH3	7.33	26.7	48,800	1225	163.64	663.0	673,133	271,941	0.13
pH4	7.32	26.8	50,400	1125	288.31	440.0	753,772	372,060	0.26
pH5	7.33	26.5	51,200	1150	288.31	340.0	753,890	346,940	0.25
pH6	7.32	27.0	49,600	1175	296.10	333.9	753,831	359,500	0.25
pH7	7.33	27.1	45,600	1475	225.97	278.7	692,798	271,851	0.15
pH8	7.33	25.7	46,400	1375	225.97	277.1	701,260	281,911	0.16
pH9	7.34	26.3	47,200	1400	249.35	277.9	697,029	276,881	0.18
pH10	7.34	27.1	50,400	1425	249.35	289.6	719,650	245,380	0.17
pH11	7.33	26.6	50,400	1475	288.31	266.3	749,318	268,151	0.20
pH12	7.33	26.8	52,000	1375	264.94	253.6	734,484	256,770	0.19
pH13	7.34	27.0	51,200	1150	264.94	208.5	751,243	234,000	0.23
Control	7.23	27.0	50,200	1110	70.13	414.0	751,324	367,124	0.06

ตารางที่ ข.2 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดภายหลังจากกระบวนการหมักที่เวลา 60 วัน

สภาวะ	pH	Temp	COD (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA (mg/l)	Reducing suger (mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)	VFA/Alk	Fe ²⁺ mg/l
pH1	7.44	24.4	20,000	1150	529.87	175.2	223,142	138,744	0.46	32.3
pH2	7.44	24.5	18,400	1175	576.62	152.0	211,323	134,983	0.49	31.6
pH3	7,55	25.4	17,600	1475	561.04	143.0	243,214	131,435	0.38	30.9
pH4	7,56	25.4	16,800	1375	607.79	144.0	234,143	143,123	0.44	30.1
pH5	7.67	25.6	12,800	1400	592.21	134.0	234,843	134,324	0.42	30
pH6	7.69	26.1	12,000	1425	818.18	113.9	251,355	132,433	0.57	29.3
pH7	7.7	26.1	12,000	1462.5	825.97	118.8	194,831	100,343	0.56	28.5
pH8	7.78	25.6	10,400	1625	825.97	117.1	195,743	95,431	0.51	26.3
pH9	7.79	20.2	12,800	1650	888.31	100.7	185,425	95,635	0.54	20.1
pH10	7.82	20.1	6,450	1675	896.10	49.6	175,384	80,432	0.53	19.2
pH11	8.81	19.4	13,600	1725	849.35	66.3	195,435	113,542	0.49	20.7
pH12	7.88	19.6	12,800	1625	693.51	56.4	184,524	134,134	0.43	19.6
pH13	7.67	21.0	15,200	1650	732.47	68.5	194,825	134,355	0.44	22.5
Control	7.44	25.1	16,342	1248	420.78	140.0	234,221	124,323	0.34	0

ตารางที่ ข.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหลือก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
0	310	300	320	450	650	700	800	800	930	1,000	1,000	710	1,000	660
1	620	600	650	900	1,300	1,420	1,620	1,610	1,880	2,400	2,550	2,010	1,900	1,360
2	935	900	980	1,350	1,950	2,140	2,440	2,450	2,830	3,800	4,150	3,310	2,800	2,060
3	1,255	1,220	1,310	1,800	2,600	2,880	3,270	3,290	3,780	5,240	5,750	4,760	3,700	2,760
4	1,580	1,520	1,640	2,250	3,250	3,620	4,110	4,150	4,730	6,680	7,350	6,210	4,580	3,530
5	1,910	1,830	1,960	2,700	3,950	4,350	4,950	5,020	5,680	8,120	8,950	7,710	5,460	4,300
6	2,245	2,150	2,290	3,150	4,650	5,090	5,790	5,890	6,630	9,560	10,550	9,260	6,360	5,050
7	2,585	2,470	2,610	3,590	5,350	5,830	6,630	6,760	7,580	11,000	12,150	10,810	7,265	5,800
8	2,935	2,800	2,960	4,040	6,070	6,580	7,470	7,630	8,530	12,450	13,950	12,360	8,180	6,550
9	3,285	3,150	3,310	4,490	6,790	7,330	8,310	8,500	9,480	13,950	15,800	13,920	9,090	7,305
10	3,635	3,500	3,660	4,960	7,520	8,080	9,150	9,370	10,430	15,450	17,800	15,470	9,995	8,065
11	3,985	3,850	4,060	5,430	8,250	8,880	9,990	10,240	11,380	16,950	19,810	17,020	10,905	8,770
12	4,335	4,200	4,460	5,900	8,980	9,680	10,830	11,110	12,330	18,450	21,825	18,575	11,810	9,525
13	4,685	4,550	4,860	6,370	9,710	10,480	11,670	11,980	13,280	19,950	23,925	20,075	12,720	10,285

ตารางที่ ข.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหล็ก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
14	5,035	4,900	5,260	6,840	10,440	11,280	12,510	12,850	14,230	21,450	26,030	21,575	13,635	11,040
15	5,385	5,250	5,660	7,310	11,170	12,080	13,350	13,720	15,180	22,945	28,130	23,135	14,540	11,790
16	5,730	5,600	6,060	7,780	11,900	12,880	14,190	14,590	16,130	24,445	30,230	24,685	15,455	12,540
17	6,060	5,950	6,460	8,250	12,630	13,680	15,030	15,460	17,080	25,945	32,330	26,235	16,365	13,290
18	6,395	6,300	6,860	8,720	13,360	14,480	15,870	16,330	18,030	27,445	34,430	27,785	17,275	14,040
19	6,715	6,650	7,260	9,190	14,090	15,280	16,710	17,200	18,980	28,945	36,535	29,340	18,185	14,790
20	7,015	7,000	7,660	9,660	14,820	16,080	17,550	18,070	19,930	30,445	38,635	30,890	19,095	15,540
21	7,315	7,350	8,060	10,130	15,550	16,880	18,390	18,940	20,880	31,945	40,735	32,440	20,005	16,290
22	7,615	7,700	8,460	10,600	16,280	17,680	19,230	19,810	21,830	33,445	42,835	33,995	20,915	17,040
23	7,915	8,050	8,860	11,075	17,010	18,480	20,070	20,680	22,780	34,945	44,950	35,545	21,820	17,815
24	8,225	8,400	9,260	11,550	17,740	19,278	20,910	21,550	23,730	36,445	47,065	37,095	22,725	18,570
25	8,530	8,750	9,660	12,027	18,465	20,073	21,750	22,420	24,680	37,945	49,170	38,645	23,635	19,335
26	8,840	9,100	10,060	12,504	19,187	20,868	22,585	23,290	25,630	39,445	51,275	40,195	24,550	20,105
27	9,140	9,450	10,460	12,974	19,907	21,658	23,420	24,160	26,580	40,945	53,370	41,745	25,470	20,880

ตารางที่ ข.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหล็ก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
28	9,440	9,800	10,860	13,444	20,622	22,448	24,250	25,020	27,530	42,445	55,470	43,295	26,375	21,645
29	9,755	10,134	11,257	13,919	21,332	23,238	25,080	25,880	28,475	43,935	57,570	44,795	27,285	22,415
30	10,060	10,469	11,652	14,389	22,042	24,028	25,910	26,735	29,420	45,425	59,675	46,295	28,190	23,190
31	10,380	10,804	11,992	14,864	22,762	24,828	26,745	27,600	30,375	46,980	61,790	47,850	29,100	23,955
32	10,705	11,140	12,332	15,334	23,487	25,633	27,585	28,470	31,320	48,495	63,900	49,405	30,015	24,725
33	11,020	11,476	12,677	15,809	24,207	26,433	28,430	29,335	32,270	49,990	66,005	50,965	30,935	25,475
34	11,335	11,811	13,027	16,289	24,917	27,228	29,260	30,210	33,215	51,295	68,105	52,515	31,840	26,210
35	11,645	12,146	13,382	16,744	25,632	28,038	30,095	31,050	34,170	52,590	70,210	54,070	32,745	26,915
36	11,955	12,486	13,732	17,204	26,357	28,843	30,910	31,860	35,070	53,810	72,215	55,615	33,615	27,600
37	12,255	12,826	14,082	17,669	27,057	29,633	31,715	32,665	35,960	54,815	74,165	57,155	34,460	28,265
38	12,560	13,161	14,437	18,119	27,762	30,388	32,515	33,465	36,825	55,815	76,015	58,555	35,190	28,815
39	12,810	13,491	14,797	18,559	28,412	31,138	33,280	34,250	37,630	56,770	77,720	59,900	35,840	29,350
40	13,045	13,821	15,137	18,949	29,012	31,813	33,995	35,005	38,415	57,690	79,410	61,220	36,455	29,825
41	13,265	14,146	15,482	19,299	29,567	32,468	34,690	35,720	39,165	58,580	80,960	62,225	37,060	30,280

ตารางที่ ข.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหล็ก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
42	13,470	14,466	15,812	19,654	30,102	33,083	35,345	36,410	39,880	59,435	82,410	63,220	37,615	30,695
43	13,672	14,776	16,147	19,999	30,612	33,633	35,970	37,060	40,565	60,285	83,765	64,205	38,155	31,060
44	13,867	15,076	16,467	20,324	31,112	34,148	36,525	37,715	41,220	61,060	85,065	64,855	38,590	31,365
45	14,017	15,376	16,787	20,644	31,517	34,633	37,030	38,330	41,835	61,805	86,070	65,405	38,915	31,630
46	14,157	15,636	17,087	20,959	31,917	35,088	37,530	38,925	42,440	62,510	87,025	65,860	39,120	31,875
47	14,277	15,891	17,377	21,269	32,292	35,488	38,005	39,475	43,015	63,115	87,875	66,295	39,275	32,060
48	14,387	16,136	17,662	21,559	32,662	35,838	38,455	39,970	43,515	63,695	88,665	66,670	39,390	32,235
49	14,487	16,366	17,912	21,834	33,017	36,178	38,880	40,435	44,000	64,205	89,420	67,025	39,490	32,390
50	14,537	16,566	18,137	22,084	33,367	36,478	39,235	40,840	44,450	64,660	90,085	67,280	39,555	32,495
51	14,577	16,716	18,337	22,309	33,667	36,728	39,550	41,195	44,855	65,075	90,635	67,485	39,600	32,550
52	14,597	16,856	18,522	22,509	33,952	36,928	39,805	41,505	45,160	65,430	91,150	67,635	39,615	32,575
53	14,607	16,961	18,622	22,659	34,217	37,078	39,970	41,760	45,420	65,735	91,580	67,745	39,620	32,580
54	14,607	17,051	18,712	22,794	34,467	37,133	40,070	41,960	45,675	66,010	91,930	67,845	39,620	32,580
55	14,607	17,101	18,782	22,899	34,667	37,168	40,115	42,065	45,880	66,215	92,235	67,930	39,620	32,580

ตารางที่ ข.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหลือก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
56	14,607	17,121	18,837	22,964	34,817	37,183	40,125	42,165	46,000	66,350	92,385	67,965	39,620	32,580
57	14,607	17,131	18,877	23,019	34,917	37,188	40,130	42,215	46,085	66,450	92,490	67,980	39,620	32,580
58	14,607	17,136	18,887	23,049	34,972	37,188	40,130	42,250	46,105	66,485	92,565	67,985	39,620	32,580
59	14,607	17,136	18,892	23,064	35,022	37,188	40,130	42,265	46,115	66,505	92,620	67,985	39,620	32,580
60	14,607	17,136	18,892	23,069	35,047	37,188	40,130	42,270	46,120	66,520	92,625	67,985	39,620	32,580

ตารางที่ ข.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหลือก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
0	0.016	0.016	0.017	0.024	0.034	0.037	0.042	0.042	0.049	0.053	0.053	0.038	0.053	0.035
1	0.033	0.032	0.034	0.048	0.069	0.075	0.086	0.085	0.100	0.127	0.135	0.106	0.101	0.072
2	0.050	0.048	0.052	0.072	0.103	0.113	0.129	0.130	0.150	0.201	0.220	0.175	0.148	0.109
3	0.066	0.065	0.069	0.095	0.138	0.153	0.173	0.174	0.200	0.278	0.305	0.252	0.196	0.146
4	0.084	0.081	0.087	0.119	0.172	0.192	0.218	0.220	0.251	0.354	0.389	0.329	0.243	0.187

ตารางที่ ข.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหลือก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
5	0.101	0.097	0.104	0.143	0.209	0.230	0.262	0.266	0.301	0.430	0.474	0.408	0.289	0.228
6	0.119	0.114	0.121	0.167	0.246	0.270	0.307	0.312	0.351	0.506	0.559	0.490	0.337	0.267
7	0.137	0.131	0.138	0.190	0.283	0.309	0.351	0.358	0.401	0.583	0.644	0.573	0.385	0.307
8	0.155	0.148	0.157	0.214	0.322	0.349	0.396	0.404	0.452	0.659	0.739	0.655	0.433	0.347
9	0.174	0.167	0.175	0.238	0.360	0.388	0.440	0.450	0.502	0.739	0.837	0.737	0.481	0.387
10	0.193	0.185	0.194	0.263	0.398	0.428	0.485	0.496	0.552	0.818	0.943	0.819	0.529	0.427
11	0.211	0.204	0.215	0.288	0.437	0.470	0.529	0.542	0.603	0.898	1.049	0.901	0.578	0.465
12	0.230	0.222	0.236	0.313	0.476	0.513	0.574	0.588	0.653	0.977	1.156	0.984	0.626	0.505
13	0.248	0.241	0.257	0.337	0.514	0.555	0.618	0.635	0.703	1.057	1.267	1.063	0.674	0.545
14	0.267	0.260	0.279	0.362	0.553	0.597	0.663	0.681	0.754	1.136	1.379	1.143	0.722	0.585
15	0.285	0.278	0.300	0.387	0.592	0.640	0.707	0.727	0.804	1.215	1.490	1.225	0.770	0.624
16	0.303	0.297	0.321	0.412	0.630	0.682	0.752	0.773	0.854	1.295	1.601	1.307	0.819	0.664
17	0.321	0.315	0.342	0.437	0.669	0.725	0.796	0.819	0.905	1.374	1.712	1.390	0.867	0.704
18	0.339	0.334	0.363	0.462	0.708	0.767	0.841	0.865	0.955	1.454	1.824	1.472	0.915	0.744

ตารางที่ ข.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหลือก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
19	0.356	0.352	0.385	0.487	0.746	0.809	0.885	0.911	1.005	1.533	1.935	1.554	0.963	0.783
20	0.372	0.371	0.406	0.512	0.785	0.852	0.930	0.957	1.056	1.613	2.046	1.636	1.011	0.823
21	0.387	0.389	0.427	0.537	0.824	0.894	0.974	1.003	1.106	1.692	2.158	1.718	1.060	0.863
22	0.403	0.408	0.448	0.561	0.862	0.936	1.019	1.049	1.156	1.771	2.269	1.801	1.108	0.903
23	0.419	0.426	0.469	0.587	0.901	0.979	1.063	1.095	1.207	1.851	2.381	1.883	1.156	0.944
24	0.436	0.445	0.490	0.612	0.940	1.021	1.108	1.141	1.257	1.930	2.493	1.965	1.204	0.984
25	0.452	0.463	0.512	0.637	0.978	1.063	1.152	1.188	1.307	2.010	2.604	2.047	1.252	1.024
26	0.468	0.482	0.533	0.662	1.016	1.105	1.196	1.234	1.358	2.089	2.716	2.129	1.300	1.065
27	0.484	0.501	0.554	0.687	1.054	1.147	1.240	1.280	1.408	2.169	2.827	2.211	1.349	1.106
28	0.500	0.519	0.575	0.712	1.092	1.189	1.284	1.325	1.458	2.248	2.938	2.293	1.397	1.146
29	0.517	0.537	0.596	0.737	1.130	1.231	1.328	1.371	1.508	2.327	3.049	2.373	1.445	1.187
30	0.533	0.555	0.617	0.762	1.167	1.273	1.372	1.416	1.558	2.406	3.161	2.452	1.493	1.228
31	0.550	0.572	0.635	0.787	1.206	1.315	1.417	1.462	1.609	2.488	3.273	2.534	1.541	1.269
32	0.567	0.590	0.653	0.812	1.244	1.358	1.461	1.508	1.659	2.569	3.385	2.617	1.590	1.310

ตารางที่ ข.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหล็ก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
33	0.584	0.608	0.671	0.837	1.282	1.400	1.506	1.554	1.709	2.648	3.496	2.699	1.639	1.349
34	0.600	0.626	0.690	0.863	1.320	1.442	1.550	1.600	1.759	2.717	3.607	2.782	1.686	1.388
35	0.617	0.643	0.709	0.887	1.358	1.485	1.594	1.645	1.810	2.785	3.719	2.864	1.734	1.426
36	0.633	0.661	0.727	0.911	1.396	1.528	1.637	1.688	1.858	2.850	3.825	2.946	1.780	1.462
37	0.649	0.679	0.746	0.936	1.433	1.570	1.680	1.730	1.905	2.903	3.928	3.027	1.825	1.497
38	0.665	0.697	0.765	0.960	1.470	1.610	1.722	1.773	1.950	2.956	4.026	3.101	1.864	1.526
39	0.678	0.715	0.784	0.983	1.505	1.649	1.763	1.814	1.993	3.007	4.117	3.173	1.898	1.555
40	0.691	0.732	0.802	1.004	1.537	1.685	1.801	1.854	2.035	3.056	4.206	3.243	1.931	1.580
41	0.703	0.749	0.820	1.022	1.566	1.720	1.837	1.892	2.074	3.103	4.288	3.296	1.963	1.604
42	0.713	0.766	0.838	1.041	1.594	1.752	1.872	1.928	2.112	3.148	4.365	3.349	1.992	1.626
43	0.724	0.783	0.855	1.059	1.621	1.781	1.905	1.963	2.149	3.193	4.437	3.401	2.021	1.645
44	0.734	0.799	0.872	1.076	1.648	1.809	1.935	1.998	2.183	3.234	4.506	3.435	2.044	1.661
45	0.742	0.814	0.889	1.093	1.669	1.834	1.961	2.030	2.216	3.274	4.559	3.464	2.061	1.675
46	0.048	0.053	0.058	0.071	0.108	0.118	0.127	0.131	0.143	0.211	0.294	0.222	0.132	0.108

ตารางที่ ข.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ 100 องศา, เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที, เหล็ก 100 g/kg TVS													
	Control	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12	pH 13
47	0.756	0.842	0.920	1.127	1.710	1.880	2.013	2.091	2.278	3.343	4.654	3.511	2.080	1.698
48	0.762	0.855	0.935	1.142	1.730	1.898	2.037	2.117	2.305	3.374	4.696	3.531	2.086	1.707
49	0.767	0.867	0.949	1.156	1.749	1.916	2.059	2.142	2.331	3.401	4.736	3.550	2.092	1.716
50	0.770	0.877	0.961	1.170	1.767	1.932	2.078	2.163	2.354	3.425	4.771	3.564	2.095	1.721
51	0.772	0.885	0.971	1.182	1.783	1.945	2.095	2.182	2.376	3.447	4.801	3.574	2.097	1.724
52	0.773	0.893	0.981	1.192	1.798	1.956	2.108	2.198	2.392	3.466	4.828	3.582	2.098	1.725
53	0.774	0.898	0.986	1.200	1.812	1.964	2.117	2.212	2.406	3.482	4.851	3.588	2.099	1.726
54	0.774	0.903	0.991	1.207	1.826	1.967	2.122	2.222	2.419	3.496	4.869	3.593	2.099	1.726
55	0.774	0.906	0.995	1.213	1.836	1.969	2.125	2.228	2.430	3.507	4.885	3.598	2.099	1.726
56	0.774	0.907	0.998	1.216	1.844	1.969	2.125	2.233	2.436	3.514	4.893	3.600	2.099	1.726
57	0.774	0.907	1.000	1.219	1.849	1.970	2.126	2.236	2.441	3.520	4.899	3.601	2.099	1.726
58	0.774	0.908	1.000	1.221	1.852	1.970	2.126	2.238	2.442	3.521	4.903	3.601	2.099	1.726
59	0.774	0.908	1.001	1.222	1.855	1.970	2.126	2.239	2.443	3.523	4.906	3.601	2.099	1.726
60	0.774	0.908	1.001	1.222	1.856	1.970	2.126	2.239	2.443	3.523	4.906	3.601	2.099	1.726

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊ส
สูงที่สุด เทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg
TVS

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Cont.	pH1	11.19355	22.87627	1.000	-65.9805	88.3676
	pH2	-26.96774	22.87627	.996	-104.1418	50.2064
	pH3	-115.25806*	22.87627	.000	-192.4322	-38.0840
	pH4	-362.12903*	22.87627	.000	-439.3031	-284.9549
	pH5	-426.19355*	22.87627	.000	-503.3676	-349.0195
	pH6	-486.90323*	22.87627	.000	-564.0773	-409.7291
	pH7	-513.51613*	22.87627	.000	-590.6902	-436.3420
	pH8	-600.12903*	22.87627	.000	-677.3031	-522.9549
	pH9	-1116.41935*	22.87627	.000	-1193.5935	-1039.2453
	pH10	-1576.09677*	22.87627	.000	-1653.2709	-1498.9227
	pH11	-1144.48387*	22.87627	.000	-1221.6580	-1067.3098
	pH12	-560.45161*	22.87627	.000	-637.6257	-483.2775
	pH13	-399.16129*	22.87627	.000	-476.3354	-321.9872
pH1	Cont.	-11.19355	22.87627	1.000	-88.3676	65.9805
	pH2	-38.16129	22.87627	.926	-115.3354	39.0128
	pH3	-126.45161*	22.87627	.000	-203.6257	-49.2775
	pH4	-373.32258*	22.87627	.000	-450.4967	-296.1485
	pH5	-437.38710*	22.87627	.000	-514.5612	-360.2130
	pH6	-498.09677*	22.87627	.000	-575.2709	-420.9227
	pH7	-524.70968*	22.87627	.000	-601.8838	-447.5356
	pH8	-611.32258*	22.87627	.000	-688.4967	-534.1485
	pH9	-1127.61290*	22.87627	.000	-1204.7870	-1050.4388
	pH10	-1587.29032*	22.87627	.000	-1664.4644	-1510.1162
	pH11	-1155.67742*	22.87627	.000	-1232.8515	-1078.5033
	pH12	-571.64516*	22.87627	.000	-648.8193	-494.4711
	pH13	-410.35484*	22.87627	.000	-487.5289	-333.1807

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊ส
สูงที่สุด เทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg
TVS (ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH2	Cont.	26.96774	22.87627	.996	-50.2064	104.1418
	pH1	38.16129	22.87627	.926	-39.0128	115.3354
	pH3	-88.29032*	22.87627	.010	-165.4644	-11.1162
	pH4	-335.16129*	22.87627	.000	-412.3354	-257.9872
	pH5	-399.22581*	22.87627	.000	-476.3999	-322.0517
	pH6	-459.93548*	22.87627	.000	-537.1096	-382.7614
	pH7	-486.54839*	22.87627	.000	-563.7225	-409.3743
	pH8	-573.16129*	22.87627	.000	-650.3354	-495.9872
	pH9	-1089.45161*	22.87627	.000	-1166.6257	-1012.2775
	pH10	-1549.12903*	22.87627	.000	-1626.3031	-1471.9549
	pH11	-1117.51613*	22.87627	.000	-1194.6902	-1040.3420
	pH12	-533.48387*	22.87627	.000	-610.6580	-456.3098
	pH13	-372.19355*	22.87627	.000	-449.3676	-295.0195
pH3	Cont.	115.25806*	22.87627	.000	38.0840	192.4322
	pH1	126.45161*	22.87627	.000	49.2775	203.6257
	pH2	88.29032*	22.87627	.010	11.1162	165.4644
	pH4	-246.87097*	22.87627	.000	-324.0451	-169.6969
	pH5	-310.93548*	22.87627	.000	-388.1096	-233.7614
	pH6	-371.64516*	22.87627	.000	-448.8193	-294.4711
	pH7	-398.25806*	22.87627	.000	-475.4322	-321.0840
	pH8	-484.87097*	22.87627	.000	-562.0451	-407.6969
	pH9	-1001.16129*	22.87627	.000	-1078.3354	-923.9872
	pH10	-1460.83871*	22.87627	.000	-1538.0128	-1383.6646
	pH11	-1029.22581*	22.87627	.000	-1106.3999	-952.0517
	pH12	-445.19355*	22.87627	.000	-522.3676	-368.0195
	pH13	-283.90323*	22.87627	.000	-361.0773	-206.7291

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊ส
สูงที่สุด เทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg
TVS (ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH4	Cont.	362.12903*	22.87627	.000	284.9549	439.3031
	pH1	373.32258*	22.87627	.000	296.1485	450.4967
	pH2	335.16129*	22.87627	.000	257.9872	412.3354
	pH3	246.87097*	22.87627	.000	169.6969	324.0451
	pH5	-64.06452	22.87627	.228	-141.2386	13.1096
	pH6	-124.77419*	22.87627	.000	-201.9483	-47.6001
	pH7	-151.38710*	22.87627	.000	-228.5612	-74.2130
	pH8	-238.00000*	22.87627	.000	-315.1741	-160.8259
	pH9	-754.29032*	22.87627	.000	-831.4644	-677.1162
	pH10	-1213.96774*	22.87627	.000	-1291.1418	-1136.7936
	pH11	-782.35484*	22.87627	.000	-859.5289	-705.1807
	pH12	-198.32258*	22.87627	.000	-275.4967	-121.1485
	pH13	-37.03226	22.87627	.941	-114.2064	40.1418
pH5	Cont.	426.19355*	22.87627	.000	349.0195	503.3676
	pH1	437.38710*	22.87627	.000	360.2130	514.5612
	pH2	399.22581*	22.87627	.000	322.0517	476.3999
	pH3	310.93548*	22.87627	.000	233.7614	388.1096
	pH4	64.06452	22.87627	.228	-13.1096	141.2386
	pH6	-60.70968	22.87627	.310	-137.8838	16.4644
	pH7	-87.32258*	22.87627	.011	-164.4967	-10.1485
	pH8	-173.93548*	22.87627	.000	-251.1096	-96.7614
	pH9	-690.22581*	22.87627	.000	-767.3999	-613.0517
	pH10	-1149.90323*	22.87627	.000	-1227.0773	-1072.7291
	pH11	-718.29032*	22.87627	.000	-795.4644	-641.1162
	pH12	-134.25806*	22.87627	.000	-211.4322	-57.0840
	pH13	27.03226	22.87627	.996	-50.1418	104.2064

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊ส
สูงที่สุด เทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg
TVS (ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH6	Cont.	486.90323*	22.87627	.000	409.7291	564.0773
	pH1	498.09677*	22.87627	.000	420.9227	575.2709
	pH2	459.93548*	22.87627	.000	382.7614	537.1096
	pH3	371.64516*	22.87627	.000	294.4711	448.8193
	pH4	124.77419*	22.87627	.000	47.6001	201.9483
	pH5	60.70968	22.87627	.310	-16.4644	137.8838
	pH7	-26.61290	22.87627	.997	-103.7870	50.5612
	pH8	-113.22581*	22.87627	.000	-190.3999	-36.0517
	pH9	-629.51613*	22.87627	.000	-706.6902	-552.3420
	pH10	-1089.19355*	22.87627	.000	-1166.3676	-1012.0195
	pH11	-657.58065*	22.87627	.000	-734.7547	-580.4065
	pH12	-73.54839	22.87627	.080	-150.7225	3.6257
	pH13	87.74194*	22.87627	.011	10.5678	164.9160
pH7	Cont.	513.51613*	22.87627	.000	436.3420	590.6902
	pH1	524.70968*	22.87627	.000	447.5356	601.8838
	pH2	486.54839*	22.87627	.000	409.3743	563.7225
	pH3	398.25806*	22.87627	.000	321.0840	475.4322
	pH4	151.38710*	22.87627	.000	74.2130	228.5612
	pH5	87.32258*	22.87627	.011	10.1485	164.4967
	pH6	26.61290	22.87627	.997	-50.5612	103.7870
	pH8	-86.61290*	22.87627	.013	-163.7870	-9.4388
	pH9	-602.90323*	22.87627	.000	-680.0773	-525.7291
	pH10	-1062.58065*	22.87627	.000	-1139.7547	-985.4065
	pH11	-630.96774*	22.87627	.000	-708.1418	-553.7936
	pH12	-46.93548	22.87627	.734	-124.1096	30.2386
	pH13	114.35484*	22.87627	.000	37.1807	191.5289

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊ส
สูงที่สุด เทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg
TVS (ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH8	Cont.	600.12903*	22.87627	.000	522.9549	677.3031
	pH1	611.32258*	22.87627	.000	534.1485	688.4967
	pH2	573.16129*	22.87627	.000	495.9872	650.3354
	pH3	484.87097*	22.87627	.000	407.6969	562.0451
	pH4	238.00000*	22.87627	.000	160.8259	315.1741
	pH5	173.93548*	22.87627	.000	96.7614	251.1096
	pH6	113.22581*	22.87627	.000	36.0517	190.3999
	pH7	86.61290*	22.87627	.013	9.4388	163.7870
	pH9	-516.29032*	22.87627	.000	-593.4644	-439.1162
	pH10	-975.96774*	22.87627	.000	-1053.1418	-898.7936
	pH11	-544.35484*	22.87627	.000	-621.5289	-467.1807
	pH12	39.67742	22.87627	.903	-37.4967	116.8515
	pH13	200.96774*	22.87627	.000	123.7936	278.1418
pH9	Cont.	1116.41935*	22.87627	.000	1039.2453	1193.5935
	pH1	1127.61290*	22.87627	.000	1050.4388	1204.7870
	pH2	1089.45161*	22.87627	.000	1012.2775	1166.6257
	pH3	1001.16129*	22.87627	.000	923.9872	1078.3354
	pH4	754.29032*	22.87627	.000	677.1162	831.4644
	pH5	690.22581*	22.87627	.000	613.0517	767.3999
	pH6	629.51613*	22.87627	.000	552.3420	706.6902
	pH7	602.90323*	22.87627	.000	525.7291	680.0773
	pH8	516.29032*	22.87627	.000	439.1162	593.4644
	pH10	-459.67742*	22.87627	.000	-536.8515	-382.5033
	pH11	-28.06452	22.87627	.994	-105.2386	49.1096
	pH12	555.96774*	22.87627	.000	478.7936	633.1418
	pH13	717.25806*	22.87627	.000	640.0840	794.4322

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊ส
สูงที่สุด เทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg
TVS (ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH10	Cont.	1576.09677*	22.87627	.000	1498.9227	1653.2709
	pH1	1587.29032*	22.87627	.000	1510.1162	1664.4644
	pH2	1549.12903*	22.87627	.000	1471.9549	1626.3031
	pH3	1460.83871*	22.87627	.000	1383.6646	1538.0128
	pH4	1213.96774*	22.87627	.000	1136.7936	1291.1418
	pH5	1149.90323*	22.87627	.000	1072.7291	1227.0773
	pH6	1089.19355*	22.87627	.000	1012.0195	1166.3676
	pH7	1062.58065*	22.87627	.000	985.4065	1139.7547
	pH8	975.96774*	22.87627	.000	898.7936	1053.1418
	pH9	459.67742*	22.87627	.000	382.5033	536.8515
	pH11	431.61290*	22.87627	.000	354.4388	508.7870
	pH12	1015.64516*	22.87627	.000	938.4711	1092.8193
	pH13	1176.93548*	22.87627	.000	1099.7614	1254.1096
pH11	Cont.	1144.48387*	22.87627	.000	1067.3098	1221.6580
	pH1	1155.67742*	22.87627	.000	1078.5033	1232.8515
	pH2	1117.51613*	22.87627	.000	1040.3420	1194.6902
	pH3	1029.22581*	22.87627	.000	952.0517	1106.3999
	pH4	782.35484*	22.87627	.000	705.1807	859.5289
	pH5	718.29032*	22.87627	.000	641.1162	795.4644
	pH6	657.58065*	22.87627	.000	580.4065	734.7547
	pH7	630.96774*	22.87627	.000	553.7936	708.1418
	pH8	544.35484*	22.87627	.000	467.1807	621.5289
	pH9	28.06452	22.87627	.994	-49.1096	105.2386
	pH10	-431.61290*	22.87627	.000	-508.7870	-354.4388
	pH12	584.03226*	22.87627	.000	506.8582	661.2064
	pH13	745.32258*	22.87627	.000	668.1485	822.4967

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบ Post Hoc Tests เพื่อบอกความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊ส
สูงที่สุด เทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นใน pH อื่นๆ เหล็กประจุศูนย์ 100 g/kg
TVS (ต่อ)

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
pH12	Cont.	560.45161*	22.87627	.000	483.2775	637.6257
	pH1	571.64516*	22.87627	.000	494.4711	648.8193
	pH2	533.48387*	22.87627	.000	456.3098	610.6580
	pH3	445.19355*	22.87627	.000	368.0195	522.3676
	pH4	198.32258*	22.87627	.000	121.1485	275.4967
	pH5	134.25806*	22.87627	.000	57.0840	211.4322
	pH6	73.54839	22.87627	.080	-3.6257	150.7225
	pH7	46.93548	22.87627	.734	-30.2386	124.1096
	pH8	-39.67742	22.87627	.903	-116.8515	37.4967
	pH9	-555.96774*	22.87627	.000	-633.1418	-478.7936
	pH10	-1015.64516*	22.87627	.000	-1092.8193	-938.4711
	pH11	-584.03226*	22.87627	.000	-661.2064	-506.8582
	pH13	161.29032*	22.87627	.000	84.1162	238.4644
pH13	Cont.	399.16129*	22.87627	.000	321.9872	476.3354
	pH1	410.35484*	22.87627	.000	333.1807	487.5289
	pH2	372.19355*	22.87627	.000	295.0195	449.3676
	pH3	283.90323*	22.87627	.000	206.7291	361.0773
	pH4	37.03226	22.87627	.941	-40.1418	114.2064
	pH5	-27.03226	22.87627	.996	-104.2064	50.1418
	pH6	-87.74194*	22.87627	.011	-164.9160	-10.5678
	pH7	-114.35484*	22.87627	.000	-191.5289	-37.1807
	pH8	-200.96774*	22.87627	.000	-278.1418	-123.7936
	pH9	-717.25806*	22.87627	.000	-794.4322	-640.0840
	pH10	-1176.93548*	22.87627	.000	-1254.1096	-1099.7614
	pH11	-745.32258*	22.87627	.000	-822.4967	-668.1485
	pH12	-161.29032*	22.87627	.000	-238.4644	-84.1162

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบความเหมือนกันของชุดข้อมูล

pH	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
pH1	61	337.7097							
Cont.	61	348.9032							
pH2	61	375.8710							
pH3	61		464.1613						
pH4	61			711.0323					
pH13	61			748.0645					
pH5	61			775.0968	775.0968				
pH6	61				835.8065	835.8065			
pH7	61					862.4194			
pH12	61					909.3548	909.3548		
pH8	61						949.0323		
pH9	61							1465.3226	
pH11	61							1493.3871	
pH10	61								1925.0000
Significant		.926	1.000	.228	.310	.080	.903	.994	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 31.000.



ภาคผนวก ค

ศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.1 ถึงปฏิบัติการแบบ Batch ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส

ตารางที่ ค.1 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ที่สภาวะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิบัติการ 30 นาที

สภาวะ	pH	Temp	COD (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA (mg/l)	Reducing suger(mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)	VFA/Alk
20g/kgVSS	7.32	26.70	52,000	925	212.73	211.17	651,341	651,341	0.23
40g/KgVSS	7.32	27.40	51,200	975	211.17	214.00	658,314	254,943	0.22
60g/kgVSS	7.20	27.50	48,800	925	217.40	232.40	653,114	257,476	0.24
80g/kgVSS	7.21	27.70	50,400	1,025	225.97	241.40	643,124	243,657	0.22
100g/kgVSS	7.20	27.80	50,400	1,025	288.31	234.40	664,314	237,563	0.28
120g/KgVSS	7.19	27.80	49,600	1,050	288.31	234.50	643,179	234,237	0.27
140g/kgVSS	7.23	28.00	48,800	1,050	218.18	213.00	651,952	254,767	0.21
160g/KgVSS	7.22	28.00	51,200	1,005	225.97	241.00	653,921	234,235	0.22
180g/kgVSS	7.25	27.80	51,200	1,027	288.31	241.20	658,231	235,133	0.28
200g/KgVSS	7.21	27.80	50,400	1,057	225.97	217.00	643,812	237,675	0.21
control	7.22	27.4	50,234	1,052	233.77	218.00	684,242	235,463	0.22

ตารางที่ ค.2 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดภายหลังการหมักที่เวลา 60 วัน ที่สภาวะการไฮโดรไลซิสกากมัน
สำปะหลังความเข้มข้น 3%TS ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

สภาวะ	pH	Temp	COD (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA (mg/l)	Reducing suger(mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)	VFA/Alk	Fe ²⁺ mg/l
20g/kgVSS	7.32	25.5	12,800	1100	483.12	56.3	190,532	114,321	0.44	29.6
40g/KgVSS	7.32	25.2	9,600	1150	475.32	45.2	189,344	104,583	0.41	30.3
60g/kgVSS	7.2	25.6	4,750	1375	592.21	30.7	145,327	65,472	0.43	33.2
80g/kgVSS	7.11	25.4	5,500	1325	794.81	34.5	167,431	76,348	0.60	33.8
100g/kgVSS	7.1	25.3	6,600	1275	810.39	39.5	167,432	79,542	0.64	37.3
120g/KgVSS	7.09	25.7	9,600	1325	864.94	35.8	203,414	105,233	0.65	37.5
140g/kgVSS	6.88	25.6	11,200	1200	880.52	44.4	215,464	107,345	0.73	39.0
160g/KgVSS	6.78	25.6	16,000	1125	903.90	52.1	232,434	108,324	0.80	39.8
180g/kgVSS	6.72	25.5	12,800	1100	919.48	53.2	265,467	113,241	0.84	39.5
200g/KgVSS	6.71	25.6	11,200	1000	981.82	55.0	265,436	113,433	0.98	40.2
control	7.12	25.1	13,684	1563	584.42	88.6	243,143	122,324	0.37	0.0



ตารางที่ ค.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
1	320	550	900	1,100	2,000	2,100	2,000	1,500	1,440	1,400	800	800
2	650	1,105	1,800	2,500	4,300	4,300	4,100	3,100	2,880	2,800	1,700	1,615
3	980	1,760	2,700	3,905	6,700	6,600	6,200	4,750	4,380	4,200	2,650	2,435
4	1,310	2,510	3,600	5,355	9,150	9,000	8,305	6,420	5,880	5,600	3,605	3,235
5	1,640	3,225	4,500	6,810	11,650	11,405	10,420	8,120	7,430	7,050	4,580	4,045
6	1,960	3,950	5,400	8,310	14,150	13,820	12,520	9,825	9,030	8,550	5,560	4,865
7	2,290	4,670	6,350	9,815	16,650	16,225	14,625	11,520	10,630	10,050	6,560	5,690
8	2,610	5,405	7,300	11,365	19,150	18,630	16,735	13,225	12,230	11,550	7,565	6,510
9	2,960	6,160	8,260	12,920	21,650	21,040	18,840	14,940	13,840	13,060	8,575	7,360
10	3,310	6,910	9,220	14,475	24,200	23,445	20,935	16,650	15,450	14,570	9,580	8,215
11	3,660	7,645	10,180	16,020	26,750	25,850	23,035	18,410	17,065	16,080	10,595	9,075
12	4,010	8,395	11,145	17,560	29,300	28,260	25,145	20,175	18,685	17,600	11,605	9,940
13	4,360	9,110	12,110	19,115	31,850	30,670	27,260	21,935	20,310	19,120	12,625	10,820

ตารางที่ ค.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
14	4,710	9,845	13,075	20,665	34,405	33,085	29,410	23,705	21,945	20,660	13,650	11,705
15	5,060	10,585	14,045	22,180	36,960	35,500	31,560	25,470	23,585	22,200	14,670	12,600
16	5,410	11,335	15,015	23,685	39,515	37,915	33,715	27,220	25,235	23,740	15,685	13,485
17	5,760	12,080	15,985	25,185	42,070	40,325	35,860	28,985	26,890	25,280	16,705	14,375
18	6,110	12,830	16,955	26,685	44,625	42,730	38,010	30,745	28,540	26,825	17,730	15,255
19	6,460	13,580	17,925	28,190	47,180	45,140	40,160	32,505	30,185	28,365	18,750	16,140
20	6,810	14,335	18,895	29,690	49,735	47,550	42,310	34,275	31,835	29,905	19,765	17,020
21	7,160	15,090	19,865	31,190	52,290	49,960	44,465	36,035	33,490	31,440	20,785	17,905
22	7,510	15,845	20,835	32,735	54,845	52,370	46,615	37,800	35,140	32,980	21,800	18,795
23	7,860	16,595	21,805	34,290	57,410	54,785	48,780	39,560	36,775	34,525	22,830	19,675
24	8,210	17,350	22,775	35,855	59,960	57,190	50,935	41,330	38,435	36,075	23,850	20,560
25	8,560	18,115	23,745	37,410	62,505	59,600	53,095	43,095	40,085	37,615	24,865	21,440
26	8,910	18,870	24,710	38,970	65,070	62,015	55,250	44,870	41,740	39,160	25,870	22,315

ตารางที่ ค.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
27	9,260	19,635	25,685	40,525	67,585	64,435	57,405	46,645	43,390	40,715	26,880	23,200
28	9,610	20,395	26,655	42,100	70,125	66,845	59,545	48,410	45,045	42,265	27,895	24,090
29	9,960	21,160	27,620	43,695	72,690	69,260	61,710	50,165	46,715	43,810	28,900	24,960
30	10,294	21,925	28,585	45,190	75,250	71,665	63,870	51,945	48,365	45,360	29,915	25,830
31	10,629	22,695	29,550	46,690	77,825	74,080	66,025	53,710	50,020	46,915	30,930	26,705
32	10,959	23,470	30,520	48,195	80,395	76,510	68,170	55,480	51,685	48,460	31,950	27,575
33	11,279	24,230	31,495	49,710	82,960	78,935	70,305	57,255	53,340	50,000	32,965	28,445
34	11,591	24,980	32,465	51,220	85,510	81,350	72,450	59,020	55,000	51,545	33,975	29,320
35	11,901	25,665	33,440	52,735	88,070	83,755	74,600	60,775	56,665	53,085	34,980	30,190
36	12,201	26,345	34,420	54,240	90,625	86,165	76,765	62,525	58,320	54,635	35,990	31,055
37	12,501	26,950	35,395	55,740	93,200	88,520	78,910	64,285	59,970	56,180	36,995	31,905
38	12,761	27,500	36,365	57,245	95,775	90,835	81,050	66,040	61,615	57,720	38,010	32,760
39	13,016	28,055	37,330	58,695	98,335	92,935	83,045	67,780	63,270	59,265	39,020	33,605

ตารางที่ ค.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
40	13,261	28,560	38,305	60,140	100,890	94,990	84,895	69,525	64,920	60,775	40,025	34,370
41	13,491	29,015	39,270	61,575	103,435	97,025	86,740	71,250	66,420	62,230	41,020	35,085
42	13,691	29,465	40,195	62,995	105,890	99,030	88,560	72,965	67,875	63,645	42,010	35,740
43	13,861	29,880	41,100	64,400	108,295	100,995	90,260	74,675	69,280	65,050	42,900	36,385
44	14,021	30,275	42,000	65,795	110,705	102,940	91,935	76,350	70,655	66,425	43,750	37,000
45	14,176	30,640	42,895	67,170	113,090	104,870	93,450	77,780	72,005	67,770	44,565	37,550
46	14,306	30,940	43,770	68,460	115,455	106,735	94,960	79,110	73,315	69,075	45,320	38,000
47	14,431	31,175	44,645	69,725	117,760	108,575	96,450	80,350	74,530	70,290	46,045	38,350
48	14,551	31,390	45,490	70,970	119,985	110,385	97,895	81,405	75,535	71,285	46,760	38,685
49	14,666	31,595	46,305	72,185	122,240	112,170	99,285	82,360	76,530	72,160	47,405	39,000
50	14,771	31,790	47,080	73,385	124,485	113,875	100,515	83,305	77,385	73,025	48,010	39,305
51	14,866	31,945	47,845	74,590	126,680	115,435	101,630	84,255	78,145	73,740	48,610	39,590
52	14,936	32,070	48,615	75,785	128,785	116,890	102,610	85,110	78,695	74,195	49,165	39,865

ตารางที่ ค.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
53	15,001	32,155	49,360	76,945	130,680	118,340	103,475	85,960	79,210	74,610	49,680	40,070
54	15,051	32,210	50,035	78,050	132,535	119,675	104,270	86,765	79,615	75,005	50,175	40,265
55	15,086	32,245	50,700	79,055	134,250	120,980	105,025	87,550	79,980	75,300	50,605	40,430
56	15,106	32,260	51,315	80,050	136,000	122,275	105,690	88,225	80,295	75,555	50,855	40,585
57	15,116	32,265	51,870	81,040	137,605	123,480	106,240	88,675	80,560	75,770	51,050	40,735
58	15,121	32,265	52,420	81,915	139,170	124,695	106,755	89,090	80,765	75,955	51,205	40,880
59	15,121	32,265	52,870	82,780	140,720	125,700	107,185	89,490	80,965	76,130	51,310	40,995
60	15,121	32,265	53,325	83,595	142,170	126,695	107,535	89,825	81,130	76,295	51,365	41,060

ตารางที่ ค.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
1	0.017	0.029	0.048	0.058	0.106	0.111	0.106	0.079	0.076	0.074	0.042	0.042
2	0.034	0.059	0.095	0.132	0.228	0.228	0.217	0.164	0.153	0.148	0.090	0.086
3	0.052	0.093	0.143	0.207	0.355	0.350	0.328	0.252	0.232	0.222	0.140	0.129
4	0.069	0.133	0.191	0.284	0.485	0.477	0.440	0.340	0.311	0.297	0.191	0.171
5	0.087	0.171	0.238	0.361	0.617	0.604	0.552	0.430	0.394	0.373	0.243	0.214
6	0.104	0.209	0.286	0.440	0.749	0.732	0.663	0.520	0.478	0.453	0.294	0.258
7	0.121	0.247	0.336	0.520	0.882	0.859	0.775	0.610	0.563	0.532	0.347	0.301
8	0.138	0.286	0.387	0.602	1.014	0.987	0.886	0.700	0.648	0.612	0.401	0.345
9	0.157	0.326	0.438	0.684	1.147	1.114	0.998	0.791	0.733	0.692	0.454	0.390
10	0.175	0.366	0.488	0.767	1.282	1.242	1.109	0.882	0.818	0.772	0.507	0.435
11	0.194	0.405	0.539	0.849	1.417	1.369	1.220	0.975	0.904	0.852	0.561	0.481
12	0.212	0.445	0.590	0.930	1.552	1.497	1.332	1.069	0.990	0.932	0.615	0.526
13	0.231	0.483	0.641	1.012	1.687	1.624	1.444	1.162	1.076	1.013	0.669	0.573

ตารางที่ ค.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
14	0.249	0.521	0.693	1.095	1.822	1.752	1.558	1.256	1.162	1.094	0.723	0.620
15	0.268	0.561	0.744	1.175	1.958	1.880	1.672	1.349	1.249	1.176	0.777	0.667
16	0.287	0.600	0.795	1.255	2.093	2.008	1.786	1.442	1.337	1.257	0.831	0.714
17	0.305	0.640	0.847	1.334	2.228	2.136	1.899	1.535	1.424	1.339	0.885	0.761
18	0.324	0.680	0.898	1.413	2.364	2.263	2.013	1.628	1.512	1.421	0.939	0.808
19	0.342	0.719	0.949	1.493	2.499	2.391	2.127	1.722	1.599	1.502	0.993	0.855
20	0.361	0.759	1.001	1.573	2.634	2.519	2.241	1.815	1.686	1.584	1.047	0.901
21	0.379	0.799	1.052	1.652	2.770	2.646	2.355	1.909	1.774	1.665	1.101	0.948
22	0.398	0.839	1.104	1.734	2.905	2.774	2.469	2.002	1.861	1.747	1.155	0.995
23	0.416	0.879	1.155	1.816	3.041	2.902	2.584	2.095	1.948	1.829	1.209	1.042
24	0.435	0.919	1.206	1.899	3.176	3.029	2.698	2.189	2.036	1.911	1.263	1.089
25	0.453	0.959	1.258	1.981	3.311	3.157	2.812	2.283	2.123	1.992	1.317	1.136
26	0.472	0.999	1.309	2.064	3.447	3.285	2.926	2.377	2.211	2.074	1.370	1.182

ตารางที่ ค.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
27	0.490	1.040	1.360	2.146	3.580	3.413	3.041	2.471	2.298	2.157	1.424	1.229
28	0.509	1.080	1.412	2.230	3.714	3.541	3.154	2.564	2.386	2.239	1.477	1.276
29	0.528	1.121	1.463	2.314	3.850	3.668	3.269	2.657	2.474	2.320	1.531	1.322
30	0.545	1.161	1.514	2.394	3.986	3.796	3.383	2.751	2.562	2.403	1.584	1.368
31	0.563	1.202	1.565	2.473	4.122	3.924	3.497	2.845	2.649	2.485	1.638	1.414
32	0.580	1.243	1.617	2.553	4.258	4.052	3.611	2.939	2.738	2.567	1.692	1.461
33	0.597	1.283	1.668	2.633	4.394	4.181	3.724	3.033	2.825	2.648	1.746	1.507
34	0.614	1.323	1.720	2.713	4.529	4.309	3.837	3.126	2.913	2.730	1.800	1.553
35	0.630	1.359	1.771	2.793	4.665	4.436	3.951	3.219	3.001	2.812	1.853	1.599
36	0.646	1.395	1.823	2.873	4.800	4.564	4.066	3.312	3.089	2.894	1.906	1.645
37	0.662	1.427	1.875	2.952	4.936	4.689	4.180	3.405	3.176	2.976	1.959	1.690
38	0.676	1.457	1.926	3.032	5.073	4.811	4.293	3.498	3.264	3.057	2.013	1.735
39	0.689	1.486	1.977	3.109	5.208	4.922	4.399	3.590	3.351	3.139	2.067	1.780

ตารางที่ ค.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
40	0.702	1.513	2.029	3.185	5.344	5.031	4.497	3.682	3.439	3.219	2.120	1.820
41	0.715	1.537	2.080	3.261	5.479	5.139	4.594	3.774	3.518	3.296	2.173	1.858
42	0.725	1.561	2.129	3.337	5.609	5.245	4.691	3.865	3.595	3.371	2.225	1.893
43	0.734	1.583	2.177	3.411	5.736	5.349	4.781	3.955	3.669	3.445	2.272	1.927
44	0.743	1.604	2.225	3.485	5.864	5.452	4.869	4.044	3.742	3.518	2.317	1.960
45	0.751	1.623	2.272	3.558	5.990	5.555	4.950	4.120	3.814	3.590	2.360	1.989
46	0.758	1.639	2.318	3.626	6.115	5.653	5.030	4.190	3.883	3.659	2.400	2.013
47	0.764	1.651	2.365	3.693	6.237	5.751	5.109	4.256	3.948	3.723	2.439	2.031
48	0.771	1.663	2.409	3.759	6.355	5.847	5.185	4.312	4.001	3.776	2.477	2.049
49	0.777	1.673	2.453	3.823	6.475	5.941	5.259	4.362	4.053	3.822	2.511	2.066
50	0.782	1.684	2.494	3.887	6.593	6.032	5.324	4.412	4.099	3.868	2.543	2.082
51	0.787	1.692	2.534	3.951	6.710	6.114	5.383	4.463	4.139	3.906	2.575	2.097
52	0.791	1.699	2.575	4.014	6.821	6.191	5.435	4.508	4.168	3.930	2.604	2.111

ตารางที่ ค.4 ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100 องศา เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที											
	Control	0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	40 g/kg TVS	60 g/kg TVS	80 g/kg TVS	100 g/kg TVS	120 g/kg TVS	140 g/kg TVS	160 g/kg TVS	180 g/kg TVS	200 g/kg TVS
53	0.795	1.703	2.614	4.075	6.922	6.268	5.481	4.553	4.195	3.952	2.631	2.122
54	0.797	1.706	2.650	4.134	7.020	6.339	5.523	4.596	4.217	3.973	2.658	2.133
55	0.799	1.708	2.685	4.187	7.111	6.408	5.563	4.637	4.236	3.988	2.680	2.141
56	0.800	1.709	2.718	4.240	7.203	6.476	5.598	4.673	4.253	4.002	2.694	2.150
57	0.801	1.709	2.747	4.292	7.288	6.540	5.627	4.697	4.267	4.013	2.704	2.158
58	0.801	1.709	2.776	4.339	7.371	6.605	5.654	4.719	4.278	4.023	2.712	2.165
59	0.801	1.709	2.800	4.385	7.453	6.658	5.677	4.740	4.288	4.032	2.718	2.171
60	0.801	1.709	2.824	4.428	7.530	6.711	5.696	4.758	4.297	4.041	2.721	2.175

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Post Hoc ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

(I) ZVI	(J) ZVI	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0 g/kg TVS	20 g/kg TVS	-221.12903*	15.75884	.000	-272.2111	-170.0470
	40 g/kg TVS	-774.03226*	15.75884	.000	-825.1143	-722.9502
	60 g/kg TVS	-1778.38710*	15.75884	.000	-1829.4691	-1727.3051
	80 g/kg TVS	-1657.58065*	15.75884	.000	-1708.6627	-1606.4986
	100 g/kg TVS	-1397.74194*	15.75884	.000	-1448.8240	-1346.6599
	120 g/kg TVS	-1000.48387*	15.75884	.000	-1051.5659	-949.4018
	140 g/kg TVS	-881.45161*	15.75884	.000	-932.5337	-830.3696
	160 g/kg TVS	-781.29032*	15.75884	.000	-832.3724	-730.2083
	180 g/kg TVS	-265.64516*	15.75884	.000	-316.7272	-214.5631
	200 g/kg TVS	-129.35484*	15.75884	.000	-180.4369	-78.2728
20 g/kg TVS	0 g/kg TVS	221.12903*	15.75884	.000	170.0470	272.2111
	40 g/kg TVS	-552.90323*	15.75884	.000	-603.9853	-501.8212
	60 g/kg TVS	-1557.25806*	15.75884	.000	-1608.3401	-1506.1760
	80 g/kg TVS	-1436.45161*	15.75884	.000	-1487.5337	-1385.3696
	100 g/kg TVS	-1176.61290*	15.75884	.000	-1227.6949	-1125.5309
	120 g/kg TVS	-779.35484*	15.75884	.000	-830.4369	-728.2728
	140 g/kg TVS	-660.32258*	15.75884	.000	-711.4046	-609.2405
	160 g/kg TVS	-560.16129*	15.75884	.000	-611.2433	-509.0792
	180 g/kg TVS	-44.51613	15.75884	.153	-95.5982	6.5659
	200 g/kg TVS	91.77419*	15.75884	.000	40.6922	142.8562

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Post Hoc ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) ZVI	(J) ZVI	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
40 g/kg TVS	0 g/kg TVS	774.03226*	15.75884	.000	722.9502	825.1143
	20 g/kg TVS	552.90323*	15.75884	.000	501.8212	603.9853
	60 g/kg TVS	-1004.35484*	15.75884	.000	-1055.4369	-953.2728
	80 g/kg TVS	-883.54839*	15.75884	.000	-934.6304	-832.4663
	100 g/kg TVS	-623.70968*	15.75884	.000	-674.7917	-572.6276
	120 g/kg TVS	-226.45161*	15.75884	.000	-277.5337	-175.3696
	140 g/kg TVS	-107.41935*	15.75884	.000	-158.5014	-56.3373
	160 g/kg TVS	-7.25806	15.75884	1.000	-58.3401	43.8240
	180 g/kg TVS	508.38710*	15.75884	.000	457.3051	559.4691
	200 g/kg TVS	644.67742*	15.75884	.000	593.5954	695.7595
60 g/kg TVS	0 g/kg TVS	1778.38710*	15.75884	.000	1727.3051	1829.4691
	20 g/kg TVS	1557.25806*	15.75884	.000	1506.1760	1608.3401
	40 g/kg TVS	1004.35484*	15.75884	.000	953.2728	1055.4369
	80 g/kg TVS	120.80645*	15.75884	.000	69.7244	171.8885
	100 g/kg TVS	380.64516*	15.75884	.000	329.5631	431.7272
	120 g/kg TVS	777.90323*	15.75884	.000	726.8212	828.9853
	140 g/kg TVS	896.93548*	15.75884	.000	845.8534	948.0175
	160 g/kg TVS	997.09677*	15.75884	.000	946.0147	1048.1788
	180 g/kg TVS	1512.74194*	15.75884	.000	1461.6599	1563.8240
	200 g/kg TVS	1649.03226*	15.75884	.000	1597.9502	1700.1143

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Post Hoc ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) ZVI	(J) ZVI	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
80 g/kg TVS	0 g/kg TVS	1657.58065*	15.75884	.000	1606.4986	1708.6627
	20 g/kg TVS	1436.45161*	15.75884	.000	1385.3696	1487.5337
	40 g/kg TVS	883.54839*	15.75884	.000	832.4663	934.6304
	60 g/kg TVS	-120.80645*	15.75884	.000	-171.8885	-69.7244
	100 g/kg TVS	259.83871*	15.75884	.000	208.7567	310.9208
	120 g/kg TVS	657.09677*	15.75884	.000	606.0147	708.1788
	140 g/kg TVS	776.12903*	15.75884	.000	725.0470	827.2111
	160 g/kg TVS	876.29032*	15.75884	.000	825.2083	927.3724
	180 g/kg TVS	1391.93548*	15.75884	.000	1340.8534	1443.0175
	200 g/kg TVS	1528.22581*	15.75884	.000	1477.1438	1579.3078
100 g/kg TVS	0 g/kg TVS	1397.74194*	15.75884	.000	1346.6599	1448.8240
	20 g/kg TVS	1176.61290*	15.75884	.000	1125.5309	1227.6949
	40 g/kg TVS	623.70968*	15.75884	.000	572.6276	674.7917
	60 g/kg TVS	-380.64516*	15.75884	.000	-431.7272	-329.5631
	80 g/kg TVS	-259.83871*	15.75884	.000	-310.9208	-208.7567
	120 g/kg TVS	397.25806*	15.75884	.000	346.1760	448.3401
	140 g/kg TVS	516.29032*	15.75884	.000	465.2083	567.3724
	160 g/kg TVS	616.45161*	15.75884	.000	565.3696	667.5337
	180 g/kg TVS	1132.09677*	15.75884	.000	1081.0147	1183.1788
	200 g/kg TVS	1268.38710*	15.75884	.000	1217.3051	1319.4691

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Post Hoc ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) ZVI	(J) ZVI	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
120 g/kg TVS	0 g/kg TVS	1000.48387*	15.75884	.000	949.4018	1051.5659
	20 g/kg TVS	779.35484*	15.75884	.000	728.2728	830.4369
	40 g/kg TVS	226.45161*	15.75884	.000	175.3696	277.5337
	60 g/kg TVS	-777.90323*	15.75884	.000	-828.9853	-726.8212
	80 g/kg TVS	-657.09677*	15.75884	.000	-708.1788	-606.0147
	100 g/kg TVS	-397.25806*	15.75884	.000	-448.3401	-346.1760
	140 g/kg TVS	119.03226*	15.75884	.000	67.9502	170.1143
	160 g/kg TVS	219.19355*	15.75884	.000	168.1115	270.2756
	180 g/kg TVS	734.83871*	15.75884	.000	683.7567	785.9208
	200 g/kg TVS	871.12903*	15.75884	.000	820.0470	922.2111
140 g/kg TVS	0 g/kg TVS	881.45161*	15.75884	.000	830.3696	932.5337
	20 g/kg TVS	660.32258*	15.75884	.000	609.2405	711.4046
	40 g/kg TVS	107.41935*	15.75884	.000	56.3373	158.5014
	60 g/kg TVS	-896.93548*	15.75884	.000	-948.0175	-845.8534
	80 g/kg TVS	-776.12903*	15.75884	.000	-827.2111	-725.0470
	100 g/kg TVS	-516.29032*	15.75884	.000	-567.3724	-465.2083
	120 g/kg TVS	-119.03226*	15.75884	.000	-170.1143	-67.9502
	160 g/kg TVS	100.16129*	15.75884	.000	49.0792	151.2433
	180 g/kg TVS	615.80645*	15.75884	.000	564.7244	666.8885
	200 g/kg TVS	752.09677*	15.75884	.000	701.0147	803.1788

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Post Hoc ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเหล็กประจุนุญที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในความเข้มข้นอื่นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) ZVI	(J) ZVI	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Significant	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
160 g/kg TVS	0 g/kg TVS	781.29032*	15.75884	.000	730.2083	832.3724
	20 g/kg TVS	560.16129*	15.75884	.000	509.0792	611.2433
	40 g/kg TVS	7.25806	15.75884	1.000	-43.8240	58.3401
	60 g/kg TVS	-997.09677*	15.75884	.000	-1048.1788	-946.0147
	80 g/kg TVS	-876.29032*	15.75884	.000	-927.3724	-825.2083
	100 g/kg TVS	-616.45161*	15.75884	.000	-667.5337	-565.3696
	120 g/kg TVS	-219.19355*	15.75884	.000	-270.2756	-168.1115
	140 g/kg TVS	-100.16129*	15.75884	.000	-151.2433	-49.0792
	180 g/kg TVS	515.64516*	15.75884	.000	464.5631	566.7272
	200 g/kg TVS	651.93548*	15.75884	.000	600.8534	703.0175
180 g/kg TVS	0 g/kg TVS	265.64516*	15.75884	.000	214.5631	316.7272
	20 g/kg TVS	44.51613	15.75884	.153	-6.5659	95.5982
	40 g/kg TVS	-508.38710*	15.75884	.000	-559.4691	-457.3051
	60 g/kg TVS	-1512.74194*	15.75884	.000	-1563.8240	-1461.6599
	80 g/kg TVS	-1391.93548*	15.75884	.000	-1443.0175	-1340.8534
	100 g/kg TVS	-1132.09677*	15.75884	.000	-1183.1788	-1081.0147
	120 g/kg TVS	-734.83871*	15.75884	.000	-785.9208	-683.7567
	140 g/kg TVS	-615.80645*	15.75884	.000	-666.8885	-564.7244
	160 g/kg TVS	-515.64516*	15.75884	.000	-566.7272	-464.5631
	200 g/kg TVS	136.29032*	15.75884	.000	85.2083	187.3724

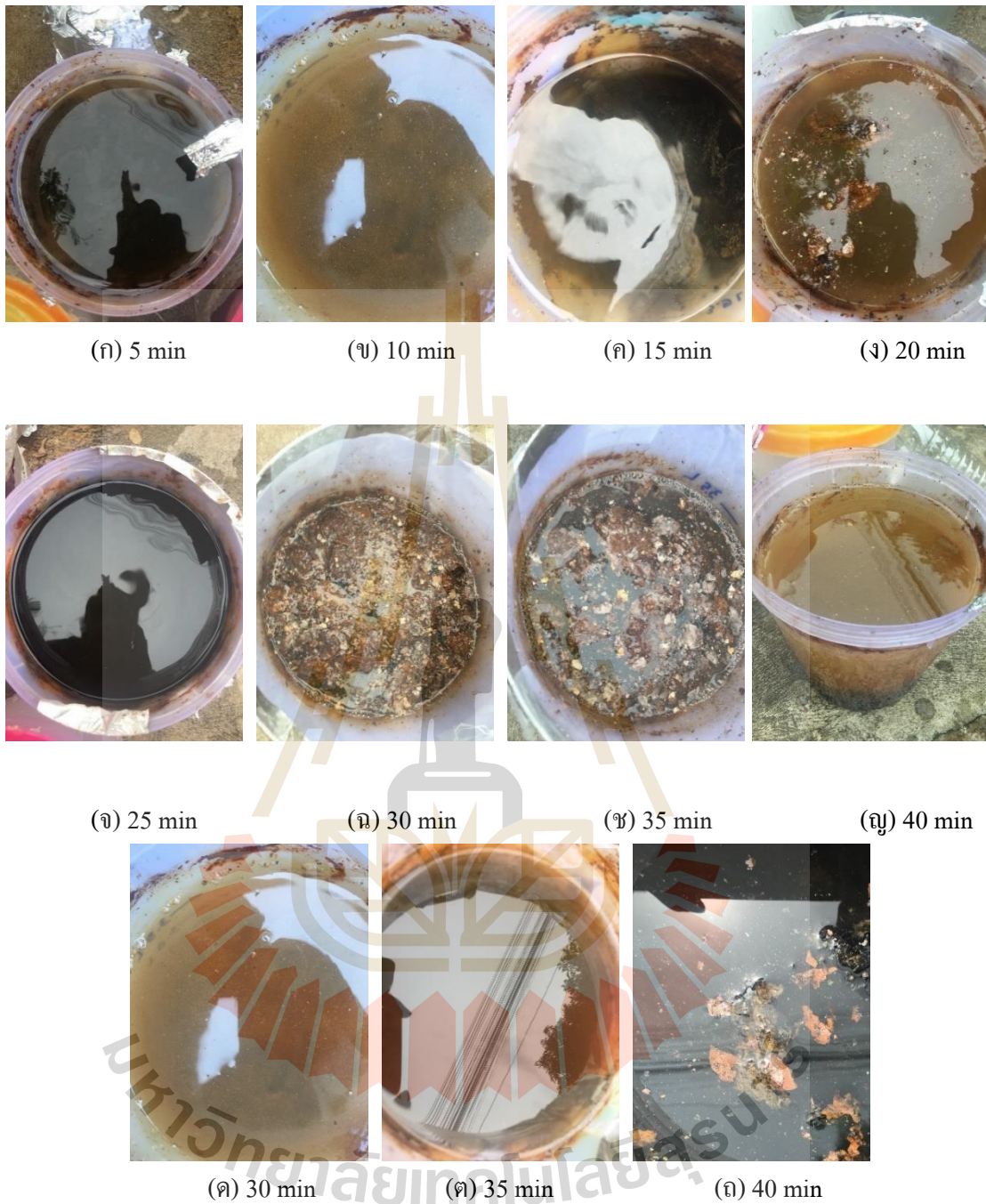
ภาคผนวก ง

ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส





รูปที่ ง.1 ถังปฏิกิริยาแบบ Batch ที่ใช้ในการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดไบโอแก๊ส



รูปที่ ง.2 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กประจุศูนย์ในเวลากการทำปฏิกิริยาการย่อยสลายกากมัน
สำปะหลังที่แตกต่างกัน ภายหลังจากหมักที่เวลา 60 วัน

ตารางที่ ง.1 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ภายหลังการไฮโดรไลซิสกาก
มันสำปะหลัง ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

สภาวะ	pH	Temp	COD (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA (mg/l)	Reducing suger (mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)	VFA/Alk
5 min	7.20	25.5	55,204	950	296.10	241.0	652,374	225,471	0.31
10 min	7.10	25.5	54,380	925	303.90	253.0	658,133	224,872	0.33
15 min	7.15	25.6	54,372	1,180	311.69	267.0	653,721	224,923	0.26
20 min	7.15	25.5	54,290	1,183	335.06	293.0	654,813	214,324	0.28
25 min	7.22	25.7	54,914	1,056	342.86	360.0	663,183	221,435	0.32
30 min	7.25	25.6	54,913	1,063	374.03	442.0	657,314	229,573	0.35
35 min	7.22	26.0	54,290	1,030	381.82	539.0	651,032	219,497	0.37
40 min	7.25	25.6	54,901	1,033	389.61	598.0	658,429	238,257	0.38
45 min	7.22	25.5	54,109	1,035	381.82	654.0	658,492	232,143	0.37
50 min	7.25	25.7	54,108	1,025	374.03	729.0	652,975	214,345	0.36
55 min	7.20	25.6	54,190	1,000	389.61	891.0	652,498	227,528	0.39
Control	7.22	27.4	53,214	1,032.00	225.97	218.00	654,213	231,431	0.22

ตารางที่ ง.2 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดภายหลังกการหมักที่เวลา 60 วัน ภายหลังกการไฮโดรไลซิ
สกากมันสำปะหลัง ที่ pH 10 อุณหภูมิ 100 °C เหล็กประจุศูนย์เข้มข้น 60 g/kg TVS

สภาวะ	pH	Temp	COD (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA (mg/l)	Reducing suger(mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)	VFA/Alk	Fe ²⁺ mg/l
5 min	8.10	26.0	14,208	1,158	763.64	67.3	203,832	83,895	0.63	40.12
10 min	7.90	26.1	13,958	1,245	781.56	67.8	201,843	83,214	0.66	40.09
15 min	8.00	25.7	13,458	1,163	773.77	76.3	199,453	81,437	0.64	40.30
20 min	7.80	26.3	12,019	1,218	794.81	55.8	167,472	73,212	0.65	38.43
25 min	7.85	26.7	11,482	1,205	763.64	43.2	165,498	73,485	0.48	35.22
30 min	7.88	25.5	5,355	1,535	836.10	38.2	143,251	61,423	0.54	33.60
35 min	7.90	25.9	5,103	1,588	919.48	44.0	167,434	55,432	1.05	33.40
40 min	7.85	25.8	9,542	1,218	945.19	67.8	195,843	61,342	0.99	33.65
45 min	7.80	26.0	9,782	1,205	1176.62	71.5	204,824	64,312	1.01	33.50
50 min	7.80	26.0	10,954	1,188	1200.00	77.3	221,498	64,565	0.99	42.40
55 min	7.56	25.9	10,745	1,213	1270.13	77.4	243,125	78,643	1.05	42.60
Control	7.72	25.1	15,342	1563	561.04	89.5	243,143	122,324	0.36	0.00



ตารางที่ ง.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
1	350	1,000	1,100	1,105	1,105	1,200	2,450	2,450	2,450	2,400	2,400	2,405
2	700	2,005	2,220	2,225	2,225	2,405	4,905	4,900	4,905	4,810	4,815	4,810
3	1,034	3,015	3,340	3,345	3,345	3,615	7,360	7,355	7,360	7,220	7,230	7,215
4	1,369	4,030	4,470	4,480	4,470	4,820	9,820	9,810	9,815	9,635	9,645	9,625
5	1,704	5,050	5,600	5,615	5,600	6,030	12,305	12,280	12,275	12,055	12,065	12,040
6	2,040	6,070	6,730	6,750	6,735	7,245	14,805	14,750	14,735	14,485	14,485	14,470
7	2,376	7,090	7,865	7,890	7,875	8,455	17,310	17,240	17,195	16,935	16,905	16,900
8	2,711	8,115	9,000	9,030	9,020	9,700	19,815	19,730	19,660	19,390	19,330	19,340
9	3,046	9,140	10,135	10,170	10,160	10,955	22,335	22,230	22,125	21,845	21,760	21,785
10	3,386	10,150	11,280	11,310	11,295	12,215	24,855	24,760	24,590	24,300	24,200	24,265
11	3,726	11,165	12,420	12,455	12,440	13,470	27,375	27,290	27,090	26,760	26,640	26,745
12	4,061	12,190	13,565	13,600	13,590	14,730	29,895	29,830	29,590	29,220	29,080	29,225
13	4,391	13,220	14,715	14,745	14,740	15,995	32,435	32,370	32,090	31,700	31,530	31,705
14	4,721	14,250	15,865	15,895	15,895	17,275	34,990	34,910	34,595	34,180	33,980	34,190

ตารางที่ ง.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
15	5,046	15,280	17,020	17,050	17,055	18,560	37,545	37,465	37,100	36,660	36,430	36,675
16	5,396	16,310	18,175	18,195	18,220	19,840	40,100	40,020	39,605	39,145	38,880	39,165
17	5,751	17,340	19,335	19,350	19,380	21,130	42,655	42,580	42,125	41,630	41,330	41,655
18	6,101	18,375	20,490	20,500	20,545	22,425	45,215	45,150	44,645	44,120	43,790	44,145
19	6,451	19,410	21,655	21,660	21,705	23,710	47,775	47,720	47,165	46,610	46,250	46,635
20	6,796	20,445	22,815	22,825	22,860	25,000	50,335	50,290	49,685	49,105	48,710	49,125
21	7,141	21,480	23,980	23,985	24,020	26,295	52,895	52,860	52,225	51,600	51,170	51,615
22	7,491	22,515	25,130	25,140	25,185	27,585	55,455	55,430	54,765	54,100	53,635	54,105
23	7,841	23,545	26,290	26,300	26,355	28,870	58,010	57,995	57,305	56,600	56,100	56,600
24	8,191	24,585	27,455	27,465	27,525	30,160	60,565	60,560	59,850	59,100	58,565	59,090
25	8,541	25,630	28,615	28,625	28,695	31,450	63,115	63,125	62,395	61,600	61,030	61,580
26	8,891	26,665	29,770	29,780	29,860	32,745	65,665	65,690	64,940	64,100	63,495	64,060
27	9,221	27,685	30,925	30,940	31,035	34,025	68,215	68,250	67,485	66,645	65,945	66,540
28	9,561	28,730	32,080	32,105	32,200	35,310	70,765	70,810	70,030	69,190	68,390	69,020

ตารางที่ ง.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
29	9,896	29,760	33,230	33,265	33,370	36,590	73,315	73,370	72,570	71,730	70,830	71,490
30	10,226	30,795	34,395	34,420	34,540	37,875	75,875	76,025	75,110	74,270	73,280	73,950
31	10,556	31,825	35,555	35,565	35,705	39,155	78,430	78,695	77,655	76,815	75,735	76,425
32	10,881	32,860	36,720	36,725	36,865	40,445	80,980	81,360	80,205	79,365	78,185	78,905
33	11,201	33,880	37,875	37,890	38,035	41,730	83,540	84,020	82,745	81,910	80,645	81,360
34	11,511	34,905	39,035	39,045	39,195	43,020	86,105	86,690	85,290	84,450	83,115	83,825
35	11,811	35,925	40,200	40,200	40,350	44,300	88,660	89,340	87,840	86,995	85,555	86,265
36	12,111	36,955	41,350	41,350	41,500	45,585	91,210	92,000	90,380	89,545	88,005	88,720
37	12,371	37,980	42,505	42,510	42,660	46,865	93,775	94,675	92,940	92,090	90,460	91,185
38	12,626	39,000	43,645	43,685	43,815	48,140	96,345	97,340	95,495	94,640	92,900	93,585
39	12,871	40,025	44,790	44,850	44,975	49,420	98,910	100,005	98,045	97,185	95,335	96,020
40	13,101	41,040	45,900	46,015	46,130	50,705	101,465	102,665	100,590	99,715	97,775	98,430
41	13,301	42,035	46,990	47,165	47,280	51,980	104,015	105,340	103,110	102,225	100,075	100,780
42	13,491	43,015	48,040	48,320	48,425	53,260	106,570	108,010	105,630	104,730	102,330	103,085

ตารางที่ ง.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
43	13,661	43,980	49,045	49,485	49,560	54,545	109,110	110,670	108,140	107,220	104,435	105,305
44	13,811	44,940	50,035	50,645	50,660	55,820	111,630	113,320	110,645	109,705	106,440	107,295
45	13,956	45,810	51,015	51,800	51,750	57,060	114,135	115,930	113,095	112,130	108,370	109,245
46	14,096	46,685	51,925	52,945	52,790	58,265	116,625	118,535	115,540	114,535	110,280	111,175
47	14,226	47,400	52,815	54,045	53,800	59,455	119,095	121,090	117,950	116,925	112,170	112,980
48	14,341	48,110	53,655	55,125	54,805	60,605	121,550	123,640	120,330	119,295	114,000	114,705
49	14,446	48,775	54,465	56,135	55,795	61,710	123,980	126,090	122,695	121,660	115,750	116,375
50	14,546	49,420	55,250	57,125	56,755	62,700	126,080	128,500	124,710	123,765	117,450	117,915
51	14,611	49,925	56,025	58,105	57,705	63,680	128,075	130,600	126,600	125,670	119,100	119,370
52	14,661	50,375	56,775	59,055	58,650	64,630	129,880	132,590	128,405	127,485	120,710	120,670
53	14,706	50,810	57,520	59,965	59,590	65,575	131,630	134,440	130,180	129,205	122,220	121,875
54	14,751	51,225	58,230	60,855	60,525	66,515	133,340	136,230	131,885	130,910	123,715	122,780
55	14,786	51,600	58,920	61,740	61,430	67,430	134,840	137,880	133,535	132,485	125,120	123,670
56	14,796	51,955	59,565	62,575	62,320	68,335	136,290	139,370	135,085	133,990	126,425	124,480

ตารางที่ ง.3 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (ml) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
57	14,801	52,300	60,175	63,350	63,200	69,200	137,695	140,830	136,545	135,380	127,670	125,220
58	14,801	52,615	60,755	64,075	64,010	70,045	139,045	142,235	137,955	136,755	128,775	126,015
59	14,801	52,920	61,320	64,730	64,760	70,860	140,365	143,580	139,275	138,045	129,770	126,625
60	14,801	53,195	61,875	65,340	65,475	71,615	141,465	144,785	140,465	139,195	130,715	127,215

ตารางที่ ง.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
1	0.019	0.053	0.058	0.059	0.059	0.064	0.130	0.130	0.130	0.127	0.127	0.127
2	0.037	0.106	0.118	0.118	0.118	0.127	0.260	0.260	0.260	0.255	0.255	0.255
3	0.055	0.160	0.177	0.177	0.177	0.191	0.390	0.390	0.390	0.382	0.383	0.382
4	0.073	0.213	0.237	0.237	0.237	0.255	0.520	0.520	0.520	0.510	0.511	0.510
5	0.090	0.267	0.297	0.297	0.297	0.319	0.652	0.650	0.650	0.639	0.639	0.638
6	0.108	0.322	0.356	0.358	0.357	0.384	0.784	0.781	0.780	0.767	0.767	0.766

ตารางที่ ง.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
7	0.126	0.376	0.417	0.418	0.417	0.448	0.917	0.913	0.911	0.897	0.895	0.895
8	0.144	0.430	0.477	0.478	0.478	0.514	1.050	1.045	1.041	1.027	1.024	1.024
9	0.161	0.484	0.537	0.539	0.538	0.580	1.183	1.177	1.172	1.157	1.153	1.154
10	0.179	0.538	0.597	0.599	0.598	0.647	1.316	1.311	1.302	1.287	1.282	1.285
11	0.197	0.591	0.658	0.660	0.659	0.713	1.450	1.445	1.435	1.417	1.411	1.417
12	0.215	0.646	0.718	0.720	0.720	0.780	1.583	1.580	1.567	1.548	1.540	1.548
13	0.233	0.700	0.779	0.781	0.781	0.847	1.718	1.715	1.700	1.679	1.670	1.679
14	0.250	0.755	0.840	0.842	0.842	0.915	1.853	1.849	1.832	1.810	1.800	1.811
15	0.267	0.809	0.901	0.903	0.903	0.983	1.989	1.984	1.965	1.942	1.930	1.943
16	0.286	0.864	0.963	0.964	0.965	1.051	2.124	2.120	2.098	2.073	2.059	2.074
17	0.305	0.918	1.024	1.025	1.026	1.119	2.259	2.255	2.231	2.205	2.189	2.206
18	0.323	0.973	1.085	1.086	1.088	1.188	2.395	2.391	2.365	2.337	2.319	2.338
19	0.342	1.028	1.147	1.147	1.150	1.256	2.530	2.528	2.498	2.469	2.450	2.470
20	0.360	1.083	1.208	1.209	1.211	1.324	2.666	2.664	2.632	2.601	2.580	2.602

ตารางที่ ง.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
21	0.378	1.138	1.270	1.270	1.272	1.393	2.802	2.800	2.766	2.733	2.710	2.734
22	0.397	1.193	1.331	1.332	1.334	1.461	2.937	2.936	2.901	2.865	2.841	2.866
23	0.415	1.247	1.392	1.393	1.396	1.529	3.073	3.072	3.035	2.998	2.971	2.998
24	0.434	1.302	1.454	1.455	1.458	1.597	3.208	3.208	3.170	3.130	3.102	3.130
25	0.452	1.358	1.516	1.516	1.520	1.666	3.343	3.343	3.305	3.263	3.233	3.262
26	0.471	1.412	1.577	1.577	1.582	1.734	3.478	3.479	3.440	3.395	3.363	3.393
27	0.488	1.466	1.638	1.639	1.644	1.802	3.613	3.615	3.574	3.530	3.493	3.524
28	0.506	1.522	1.699	1.700	1.706	1.870	3.748	3.751	3.709	3.665	3.622	3.656
29	0.524	1.576	1.760	1.762	1.767	1.938	3.883	3.886	3.844	3.799	3.752	3.787
30	0.542	1.631	1.822	1.823	1.829	2.006	4.019	4.027	3.978	3.934	3.881	3.917
31	0.559	1.686	1.883	1.884	1.891	2.074	4.154	4.168	4.113	4.069	4.011	4.048
32	0.576	1.740	1.945	1.945	1.953	2.142	4.289	4.309	4.248	4.204	4.141	4.179
33	0.593	1.794	2.006	2.007	2.015	2.210	4.425	4.450	4.383	4.338	4.271	4.309
34	0.610	1.849	2.068	2.068	2.076	2.279	4.561	4.592	4.517	4.473	4.402	4.440

ตารางที่ ง.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
35	0.626	1.903	2.129	2.129	2.137	2.346	4.696	4.732	4.653	4.608	4.532	4.569
36	0.641	1.957	2.190	2.190	2.198	2.414	4.831	4.873	4.787	4.743	4.661	4.699
37	0.655	2.012	2.251	2.252	2.260	2.482	4.967	5.015	4.923	4.878	4.791	4.830
38	0.669	2.066	2.312	2.314	2.321	2.550	5.103	5.156	5.058	5.013	4.921	4.957
39	0.682	2.120	2.372	2.376	2.382	2.618	5.239	5.297	5.193	5.148	5.050	5.086
40	0.694	2.174	2.431	2.437	2.443	2.686	5.374	5.438	5.328	5.282	5.179	5.213
41	0.705	2.226	2.489	2.498	2.504	2.753	5.509	5.579	5.461	5.414	5.301	5.338
42	0.715	2.278	2.544	2.559	2.565	2.821	5.645	5.721	5.595	5.547	5.420	5.460
43	0.724	2.329	2.598	2.621	2.625	2.889	5.779	5.862	5.728	5.679	5.532	5.578
44	0.732	2.380	2.650	2.682	2.683	2.957	5.913	6.002	5.860	5.811	5.638	5.683
45	0.739	2.426	2.702	2.744	2.741	3.022	6.045	6.140	5.990	5.939	5.740	5.786
46	0.747	2.473	2.750	2.804	2.796	3.086	6.177	6.278	6.120	6.066	5.841	5.889
47	0.753	2.511	2.797	2.863	2.850	3.149	6.308	6.414	6.247	6.193	5.941	5.984
48	0.760	2.548	2.842	2.920	2.903	3.210	6.438	6.549	6.373	6.319	6.038	6.075

ตารางที่ ง.4 ปริมาณไบโอแก๊สสะสม (m³/kg TVS) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการหมัก 60 วัน (ต่อ)

วันที่	pH 10 อุณหภูมิ 100°C ZVI 60 g/kg TVS											
	Control	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	25 min.	30 min.	35 min.	40 min.	45 min.	50 min.	55 min.
49	0.765	2.583	2.885	2.973	2.955	3.269	6.567	6.678	6.499	6.444	6.131	6.164
50	0.770	2.618	2.926	3.026	3.006	3.321	6.678	6.806	6.605	6.555	6.221	6.245
51	0.774	2.644	2.967	3.078	3.056	3.373	6.784	6.917	6.706	6.656	6.308	6.323
52	0.777	2.668	3.007	3.128	3.106	3.423	6.879	7.023	6.801	6.752	6.394	6.391
53	0.779	2.691	3.047	3.176	3.156	3.473	6.972	7.121	6.895	6.843	6.474	6.455
54	0.781	2.713	3.084	3.223	3.206	3.523	7.063	7.216	6.985	6.934	6.553	6.503
55	0.783	2.733	3.121	3.270	3.254	3.572	7.142	7.303	7.073	7.017	6.627	6.550
56	0.784	2.752	3.155	3.314	3.301	3.619	7.219	7.382	7.155	7.097	6.696	6.593
57	0.784	2.770	3.187	3.355	3.347	3.665	7.293	7.459	7.232	7.171	6.762	6.632
58	0.784	2.787	3.218	3.394	3.390	3.710	7.365	7.534	7.307	7.243	6.821	6.675
59	0.784	2.803	3.248	3.428	3.430	3.753	7.435	7.605	7.377	7.312	6.873	6.707
60	0.784	2.818	3.277	3.461	3.468	3.793	7.493	7.669	7.440	7.373	6.923	6.738

ตารางที่ ๓.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุด
เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การ
วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5 min	10 min	-120.32258*	7.84734	.000	-145.7596	-94.8855
	15 min	-120.64516*	7.84734	.000	-146.0822	-95.2081
	20 min	-125.16129*	7.84734	.000	-150.5983	-99.7243
	25 min	-236.45161*	7.84734	.000	-261.8886	-211.0146
	30 min	-1503.38710*	7.84734	.000	-1528.8241	-1477.9501
	35 min	-1511.93548*	7.84734	.000	-1537.3725	-1486.4985
	40 min	-1478.38710*	7.84734	.000	-1503.8241	-1452.9501
	45 min	-1451.29032*	7.84734	.000	-1476.7274	-1425.8533
	50 min	-1416.45161*	7.84734	.000	-1441.8886	-1391.0146
	55 min	-1438.70968*	7.84734	.000	-1464.1467	-1413.2726
10 min	5 min	120.32258*	7.84734	.000	94.8855	145.7596
	15 min	-.32258	7.84734	1.000	-25.7596	25.1145
	20 min	-4.83871	7.84734	1.000	-30.2757	20.5983
	25 min	-116.12903*	7.84734	.000	-141.5661	-90.6920
	30 min	-1383.06452*	7.84734	.000	-1408.5015	-1357.6275
	35 min	-1391.61290*	7.84734	.000	-1417.0499	-1366.1759
	40 min	-1358.06452*	7.84734	.000	-1383.5015	-1332.6275
	45 min	-1330.96774*	7.84734	.000	-1356.4048	-1305.5307
	50 min	-1296.12903*	7.84734	.000	-1321.5661	-1270.6920
	55 min	-1318.38710*	7.84734	.000	-1343.8241	-1292.9501

ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด
เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การ
วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
15 min	5 min	120.64516*	7.84734	.000	95.2081	146.0822
	10 min	.32258	7.84734	1.000	-25.1145	25.7596
	20 min	-4.51613	7.84734	1.000	-29.9532	20.9209
	25 min	-115.80645*	7.84734	.000	-141.2435	-90.3694
	30 min	-1382.74194*	7.84734	.000	-1408.1790	-1357.3049
	35 min	-1391.29032*	7.84734	.000	-1416.7274	-1365.8533
	40 min	-1357.74194*	7.84734	.000	-1383.1790	-1332.3049
	45 min	-1330.64516*	7.84734	.000	-1356.0822	-1305.2081
	50 min	-1295.80645*	7.84734	.000	-1321.2435	-1270.3694
	55 min	-1318.06452*	7.84734	.000	-1343.5015	-1292.6275
20 min	5 min	125.16129*	7.84734	.000	99.7243	150.5983
	10 min	4.83871	7.84734	1.000	-20.5983	30.2757
	15 min	4.51613	7.84734	1.000	-20.9209	29.9532
	25 min	-111.29032*	7.84734	.000	-136.7274	-85.8533
	30 min	-1378.22581*	7.84734	.000	-1403.6628	-1352.7888
	35 min	-1386.77419*	7.84734	.000	-1412.2112	-1361.3372
	40 min	-1353.22581*	7.84734	.000	-1378.6628	-1327.7888
	45 min	-1326.12903*	7.84734	.000	-1351.5661	-1300.6920
	50 min	-1291.29032*	7.84734	.000	-1316.7274	-1265.8533
	55 min	-1313.54839*	7.84734	.000	-1338.9854	-1288.1114

ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด
เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การ
วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
25 min	5 min	236.45161*	7.84734	.000	211.0146	261.8886
	10 min	116.12903*	7.84734	.000	90.6920	141.5661
	15 min	115.80645*	7.84734	.000	90.3694	141.2435
	20 min	111.29032*	7.84734	.000	85.8533	136.7274
	30 min	-1266.93548*	7.84734	.000	-1292.3725	-1241.4985
	35 min	-1275.48387*	7.84734	.000	-1300.9209	-1250.0468
	40 min	-1241.93548*	7.84734	.000	-1267.3725	-1216.4985
	45 min	-1214.83871*	7.84734	.000	-1240.2757	-1189.4017
	50 min	-1180.00000*	7.84734	.000	-1205.4370	-1154.5630
	55 min	-1202.25806*	7.84734	.000	-1227.6951	-1176.8210
30 min	5 min	1503.38710*	7.84734	.000	1477.9501	1528.8241
	10 min	1383.06452*	7.84734	.000	1357.6275	1408.5015
	15 min	1382.74194*	7.84734	.000	1357.3049	1408.1790
	20 min	1378.22581*	7.84734	.000	1352.7888	1403.6628
	25 min	1266.93548*	7.84734	.000	1241.4985	1292.3725
	35 min	-8.54839	7.84734	.991	-33.9854	16.8886
	40 min	25.00000	7.84734	.059	-.4370	50.4370
	45 min	52.09677*	7.84734	.000	26.6597	77.5338
	50 min	86.93548*	7.84734	.000	61.4985	112.3725
	55 min	64.67742*	7.84734	.000	39.2404	90.1145

ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุด
เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การ
วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
35 min	5 min	1511.93548*	7.84734	.000	1486.4985	1537.3725
	10 min	1391.61290*	7.84734	.000	1366.1759	1417.0499
	15 min	1391.29032*	7.84734	.000	1365.8533	1416.7274
	20 min	1386.77419*	7.84734	.000	1361.3372	1412.2112
	25 min	1275.48387*	7.84734	.000	1250.0468	1300.9209
	30 min	8.54839	7.84734	.991	-16.8886	33.9854
	40 min	33.54839*	7.84734	.001	8.1114	58.9854
	45 min	60.64516*	7.84734	.000	35.2081	86.0822
	50 min	95.48387*	7.84734	.000	70.0468	120.9209
	55 min	73.22581*	7.84734	.000	47.7888	98.6628
40 min	5 min	1478.38710*	7.84734	.000	1452.9501	1503.8241
	10 min	1358.06452*	7.84734	.000	1332.6275	1383.5015
	15 min	1357.74194*	7.84734	.000	1332.3049	1383.1790
	20 min	1353.22581*	7.84734	.000	1327.7888	1378.6628
	25 min	1241.93548*	7.84734	.000	1216.4985	1267.3725
	30 min	-25.00000	7.84734	.059	-50.4370	.4370
	35 min	-33.54839*	7.84734	.001	-58.9854	-8.1114
	45 min	27.09677*	7.84734	.026	1.6597	52.5338
	50 min	61.93548*	7.84734	.000	36.4985	87.3725
	55 min	39.67742*	7.84734	.000	14.2404	65.1145

ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงที่สุด
เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การ
วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
45 min	5 min	1451.29032*	7.84734	.000	1425.8533	1476.7274
	10 min	1330.96774*	7.84734	.000	1305.5307	1356.4048
	15 min	1330.64516*	7.84734	.000	1305.2081	1356.0822
	20 min	1326.12903*	7.84734	.000	1300.6920	1351.5661
	25 min	1214.83871*	7.84734	.000	1189.4017	1240.2757
	30 min	-52.09677*	7.84734	.000	-77.5338	-26.6597
	35 min	-60.64516*	7.84734	.000	-86.0822	-35.2081
	40 min	-27.09677*	7.84734	.026	-52.5338	-1.6597
	50 min	34.83871*	7.84734	.001	9.4017	60.2757
	55 min	12.58065	7.84734	.880	-12.8564	38.0177
50 min	5 min	1416.45161*	7.84734	.000	1391.0146	1441.8886
	10 min	1296.12903*	7.84734	.000	1270.6920	1321.5661
	15 min	1295.80645*	7.84734	.000	1270.3694	1321.2435
	20 min	1291.29032*	7.84734	.000	1265.8533	1316.7274
	25 min	1180.00000*	7.84734	.000	1154.5630	1205.4370
	30 min	-86.93548*	7.84734	.000	-112.3725	-61.4985
	35 min	-95.48387*	7.84734	.000	-120.9209	-70.0468
	40 min	-61.93548*	7.84734	.000	-87.3725	-36.4985
	45 min	-34.83871*	7.84734	.001	-60.2757	-9.4017
	55 min	-22.25806	7.84734	.149	-47.6951	3.1790

ตารางที่ ๓.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไบโอแก๊สสูงสุด
เปรียบเทียบกับปริมาณไบโอแก๊สที่เกิดขึ้นในเวลาการทำปฏิกิริยาอื่นๆ โดยใช้การ
วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) (ต่อ)

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
55 min	5 min	1438.70968*	7.84734	.000	1413.2726	1464.1467
	10 min	1318.38710*	7.84734	.000	1292.9501	1343.8241
	15 min	1318.06452*	7.84734	.000	1292.6275	1343.5015
	20 min	1313.54839*	7.84734	.000	1288.1114	1338.9854
	25 min	1202.25806*	7.84734	.000	1176.8210	1227.6951
	30 min	-64.67742*	7.84734	.000	-90.1145	-39.2404
	35 min	-73.22581*	7.84734	.000	-98.6628	-47.7888
	40 min	-39.67742*	7.84734	.000	-65.1145	-14.2404
	45 min	-12.58065	7.84734	.880	-38.0177	12.8564
	50 min	22.25806	7.84734	.149	-3.1790	47.6951
*. The mean difference is significant at the 0.05 level.						



ตารางที่ ง.6 ตารางเปรียบเทียบความเหมือนกันของข้อมูล

Time	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
5 min	61	1026.6129						
10 min	61		1146.9355					
15 min	61		1147.2581					
20 min	61		1151.7742					
25 min	61			1263.0645				
50 min	61				2443.0645			
55 min	61				2465.3226	2465.3226		
45 min	61					2477.9032		
40 min	61						2505.0000	
30 min	61						2530.0000	2530.0000
35 min	61							2538.5484
Sig.		1.000	1.000	1.000	.149	.880	.059	.991

ภาคผนวก จ

รายการคำนวณความคุ้มค่าในการดำเนินงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จ.1 การคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง

จ.1.1 การคำนวณหาปริมาณกรด H_2SO_4 เข้มข้นที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส ที่ pH 1

สารละลาย H_2SO_4 ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสคือ ความเข้มข้น 5 N ปริมาตร 82.30 ml ต่อปริมาณกากมันสำปะหลัง 18.88 g TVS ในการทดลองเติมสารละลายกรดเข้มข้น 5 N ปริมาตร 82.30 ml ดังนั้นจะมีกรดซัลฟูริกเข้มข้นเท่ากับ

$$\frac{82.30 \text{ ml} \times 135.87 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 11.18 \text{ ml}$$

$$\frac{11.18 \text{ ml} \times 1,000 \text{ g}}{18.88 \text{ g} \times 1 \text{ kg}} = 592.4 \text{ ml/kg TVS}$$

ดังนั้น กรดซัลฟูริกเข้มข้นที่ใช้ เท่ากับ 592.4 ml/kg TVS

จ.1.2 การคำนวณหาปริมาณ NaOH เข้มข้นที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสที่ pH 13

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสคือ ความเข้มข้น 5 N ปริมาตร 93.30 ml ต่อปริมาณกากมันสำปะหลัง 18.88 g TVS ดังนั้นจะมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ

$$\frac{93.30 \text{ ml} \times 200 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 18.66 \text{ g}$$

$$\frac{18.66 \text{ g} \times 1,000 \text{ g}}{18.88 \text{ g} \times 1 \text{ kg}} = 988.35 \text{ g/kg TVS}$$

ดังนั้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ เท่ากับ 988.35 g/kg TVS

จ.1.3 การคำนวณหาปริมาณ Na_2CO_3 เข้มข้นที่ใช้ในการปรับ pH เป็นกลาง ที่ pH 1

สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการปรับ pH เป็นกลางคือ ความเข้มข้น 5 N ปริมาตร 78.00 ml ต่อปริมาณกากมันสำปะหลัง 18.88 g TVS ดังนั้นจะมีโซเดียมคาร์บอเนตเท่ากับ

$$\frac{78.00 \text{ ml} \times 265.00 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 20.67 \text{ g}$$

$$\frac{20.67 \text{ g} \times 1,000 \text{ g}}{18.88 \text{ g} \times 1 \text{ kg}} = 1,094.81 \text{ g/kg TVS}$$

ดังนั้น สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ เท่ากับ 1,094.81 g/kg TVS

จ.1.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายในส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสและปรับพีเอช

- ราคากรดซัลฟูริกเข้มข้น ชนิด AR grade ปริมาตร 2,500 ml ราคา 435 บาท ในการทดลองใช้ปริมาณสารละลายกรด 592.4 ml/kg TVS

$$\text{ราคา H}_2\text{SO}_4 \text{ 5 N} = \frac{592.4 \text{ ml/kg TVS} \times 435 \text{ บาท}}{2,500 \text{ ml}} = 103.08 \text{ บาท/kg TVS}$$

- ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิด AR grade ปริมาณ 1,000 g ราคา 340 บาท ในการทดลองใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 988.35 g/kg TVS

$$\text{ราคา NaOH 5 N} = \frac{988.35 \text{ g/kg TVS} \times 340 \text{ บาท}}{1000 \text{ g}} = 336.04 \text{ บาท/kg TVS}$$

- ราคาโซเดียมคาร์บอเนต ชนิด AR grade ปริมาณ 500 g ราคา 370 บาท ในการทดลองใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 1,094.81 g/kg TVS

$$\text{ราคา Na}_2\text{CO}_3 \text{ 5 N} = \frac{1,094.81 \text{ g/kg TVS} \times 370 \text{ บาท}}{500 \text{ g}} = 810.16 \text{ บาท/kg TVS}$$

จ.2 การคำนวณพลังงานทดแทนที่ได้จากการทดลอง

จ.2.1 พลังทดแทนในรูปของแก๊สหุงต้ม

ที่สภาวะ pH 1 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที กากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาในการหมัก 60 วัน มีปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น 0.37 m³/kg TVS

$$\begin{aligned}
 \text{ทดแทนแก๊สหุงต้ม (kg LPG/kg TVS)} &= \frac{\text{ปริมาณแก๊สมีเทน (m}^3/\text{kg TVS)} \times 0.46 \text{ (kg LPG)}}{1 \text{ m}^3} \\
 &= 0.37 \text{ m}^3/\text{kg TVS} \times 0.46 \text{ kg LPG /m}^3 \\
 &= 0.17 \text{ kg LPG/kg TVS} \\
 \text{ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/ kg TVS)} &= \text{ทดแทนแก๊สหุงต้ม} \left(\frac{\text{kg LPG}}{\text{kg TVS}} \right) \times 18.3 \left(\frac{\text{บาท}}{\text{kg LPG}} \right) \\
 &= 0.17 \left(\frac{\text{kg LPG}}{\text{kg TVS}} \right) \times 18.3 \left(\frac{\text{บาท}}{\text{kg LPG}} \right) \\
 &= 3.15 \text{ บาท/ kg TVS}
 \end{aligned}$$

จ.2.2 พลังทดแทนในรูปของพลังงานไฟฟ้า

ที่สภาวะ pH 1 อุณหภูมิ 100 °C และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที ถากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ 18.88 g TVS ระยะเวลาในการหมัก 60 วัน มีปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น 0.37 m³/ kg TVS

$$\begin{aligned}
 \text{ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (kW/hr - Kg TVS)} &= \frac{\text{ปริมาณแก๊สมีเทน(m}^3/\text{kg TVS)} \times 1.2 \text{ (kW/hr)}}{1 \text{ m}^3} \\
 &= 0.37 \text{ m}^3/\text{kg TVS} \times 1.2 \text{ kW/hr-m}^3 \\
 &= 0.45 \text{ kW/hr - Kg TVS} \\
 \text{ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/ Kg TVS)} &= \text{ทดแทนพลังงานไฟฟ้า} \left(\frac{\text{kW/h}}{\text{kg TVS}} \right) \times 2.2695 \left(\frac{\text{บาท}}{\text{kW/h}} \right) \\
 &= 0.45 \left(\frac{\text{kW/h}}{\text{kg TVS}} \right) \times 2.2695 \left(\frac{\text{บาท}}{\text{kW/h}} \right) \\
 &= 1.02 \text{ บาท/ Kg TVS}
 \end{aligned}$$



ภาคผนวก ฉ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

- บทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ
 อุษา ยิ่งชล, นิตยา บุญเทียน, นัทรลดา เพ็ชร์ชัย และ Pyae, H.A. (2561). การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สจากกากแป้งมัน. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**. ปีที่ 29 ฉบับที่ 1: 53-63

นัทรลดา เพ็ชร์ชัย, นิตยา บุญเทียน, อุษา ยิ่งชล, และ Pyae, H.A. (2560). การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยใช้แหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกัน. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**. ปีที่ 28 ฉบับที่ 2: 41-52
- บทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับประเทศ
 นัทรลดา เพ็ชร์ชัย, นิตยา บุญเทียน, อุษา ยิ่งชล และ Pyae, H.A. (2559). การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ A2/O โดยนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง. **การประชุมวิชาการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมประจำปีครั้งที่ 27 สวสท.'58**: หน้า 109-117

อุษา ยิ่งชล, นิตยา บุญเทียน, นัทรลดา เพ็ชร์ชัย และ Pyae, H.A. (2559). การเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศโดยใช้เหล็กประจุศูนย์. **การประชุมวิชาการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมประจำปีครั้งที่ 27 สวสท.'58**: หน้า 67-75

Boontian, N., Pyae, H.A., Yingchon, U., and Piasai, C. (2016). Methanogenic Archaea: A Review of Microbial Communities in Anaerobic Digesters. **Proceedings of the 5th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management**. pp 125-126

Pyae, H.A., Boontian, N., Yingchon, U., and Piasai, C. (2559). Biogas Production from Cassava Plup: Review of Current Condition and Future Perspective. **การประชุมวิชาการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมประจำปีครั้งที่ 27 สวสท.'58**: หน้า 11-17

Yingchon, U., Boontian, N., Pyae, H.A., and Piasai, C. (2016). Enhancement of Anaerobic Sludge Digestion by Zero Valent Iron: A Review. **Proceedings of the 5th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management**. pp 9-10

■ ผลงานอื่นๆ

Boontian, N., and Yingchon, U. (2017). Increasing Efficiency of Biogas Cassava Pulp with Pre-treatment Oral Presentations. Renewable Energy Sources - Research and Business (RESRB) 2017 Conference. June 19 - 21, Wrocław, Poland. [นำเสนอด้วยวาจา]

Piasai, C., Boontian, N., Yingchon, U., and Pyae, H.A. (2017). Effect of Acetate as a Sole Carbon Source for Enhance Biological Phosphorus Removal. Oral Presentations. Renewable Energy Sources - Research and Business (RESRB) 2017 Conference. June 19 - 21, Wrocław, Poland. [นำเสนอด้วยวาจา]

Yingchon, U., Boontian, N., Pyae, H.A., and Piasai, C. (2017). Critical Effect of Total Solids on Cassava Pulp Biogas. Oral Presentations. Renewable Energy Sources - Research and Business (RESRB) 2017 Conference. June 19 - 21, Wrocław, Poland. [นำเสนอด้วยวาจา]



การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยใช้แหล่งคาร์บอนที่ต่างกัน
EFFICIENCY ENHANCEMENT OF BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL WITH DIFFERENCE
CARBON SOURCES

ฉัตรลดา เพ็ชร์ชัย¹ นิตยา บุญเทียน² อุษา ยิ่งชล³ และ Htay Aung Pyae⁴

^{1,3,4} นักศึกษา, สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² อาจารย์, สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย โดยใช้ระบบ EBPR ซึ่งจะอาศัยสภาวะแอนแอโรบิก แอนอกซิก และแอโรบิก ใช้สูตรอาหารทั้งหมด 4 สูตร ที่มีอัตราส่วนของกลูโคสต่อกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่แตกต่างกัน กำหนด SRT เท่ากับ 20 วัน พบว่าทุกสูตรสามารถกำจัด COD ได้สูง (ร้อยละ 70 - 100) ประสิทธิภาพในการกำจัด NH_3 สูงถึงร้อยละ 100 ปริมาณ NO_2^- และ NO_3^- ในน้ำทิ้งมีค่าต่ำกว่า 0.01 และ 0.1 มก./ล.ตามลำดับ แต่สูตรที่ 4 ที่ใช้แหล่งคาร์บอนเป็นอะซิเตท (CH_3COONa) ทั้งหมด มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงที่สุดถึงร้อยละ 99 กล่าวได้ว่า PAOs มีความสามารถกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย CH_3COONa รวมถึงที่อัตราส่วน COD:P ที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส

คำสำคัญ: อะซิเตท, อีบีพีอาร์, จีเอโอ, พีเอโอ, ฟอสฟอรัส

ABSTRACT

The aim of this project is to study biological phosphorus removal in term of different carbon source. Anaerobic-anoxic-aerobic conditions included in enhanced biological phosphorus removal (EBPR). This study used 4 types of synthetic wastewater having different ratio of glucose to acetic acid. The SRT was 20 days. Overall experimental results demonstrated that the COD removal (70 - 100%). The removal efficiency of NH_3 found almost 100%. Nitrite and nitrate in the effluent were less than 0.01 and 0.1 mg/L., respectively. However Part 4 was effective in removing phosphorus up to 99%, in which usage of carbon source was 100%. These conditions were suitable for growth of PAOs that have the ability to eliminate phosphorus. Acetate and the ratio of COD:P influenced the efficiency of phosphorus removal.

KEYWORDS: Acetate, EBPR, GAOs, PAOs, Phosphorus

Chatlada Piasai¹ Nittaya Boontian² Usa Yingchon³ and Htay Aung Pyae⁴

^{1,2,3,4} School of Environmental Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

1. บทนำ

ปัจจุบันปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) เป็นปัญหาที่เกิดจากปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงเกินกำหนด รวมถึงความเข้มข้นของฟอสเฟตสูงในน้ำทิ้งที่ปล่อยสู่แหล่งน้ำ โดยระบบบำบัดน้ำเสีย (WWTPs) พบค่าฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 3.01 - 55.73 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร [1] ซึ่งเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดชุมชนของประเทศไทยที่ได้กำหนดมาตรฐานของฟอสฟอรัสไว้ไม่เกิน 2 มก./ล. ในรูปของฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus) [2] ระบบ enhanced biological phosphorus removal (EBPR) ถูกนำมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย และได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีที่ประหยัดในการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย [3] โดยกระบวนการนี้ประสบความสำเร็จเนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่าเซลล์ปกติ เป็นกลุ่มแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟิก (heterotrophic) ที่ชื่อว่าทีเอโอ (polyphosphate accumulating organisms, PAOs) [4-5] ซึ่งจะปล่อยฟอสเฟตออกมาจากการสลายตัวของโพลีฟอสเฟต (Poly-P) ซึ่งให้พลังงานและคายพลังงานออกมาพร้อมกัน [6] กระบวนการนี้ประกอบไปด้วยสถานะแอนแอโรบิก สถานะแอนอ็อกซิก และสถานะเอโรบิก ซึ่งจะกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียให้ลดน้อยลง ภายใต้สถานะที่จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนและจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน หมกกรุด โดยอาศัยเอนไซม์นอกเซลล์ (extracellular enzymes) หลายชนิด และเปลี่ยนรูปเป็นสารอินทรีย์อย่างง่าย ส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันระเหยง่าย หรือวีเอฟเอ (Volatile fatty acids, VFAs) ซึ่งเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ เพื่อสร้างอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine Triphosphate, ATP) และอะดีโนซีนไดฟอสเฟต (Adenosine Diphosphate, ADP) ซึ่งจะถูกลูกกลืนเก็บไว้ในตัวของ PAOs เพื่อให้เกิดพลังงานที่จะดูดกลืนฟอสเฟตจากสารละลาย ซึ่งฟอสเฟตที่ถูกดูดกลืนจะมากกว่าฟอสเฟตที่ปล่อยออกมา เมื่อเราให้น้ำผ่านกระบวนการตกตะกอน กำจัดเซลล์จุลินทรีย์ออกจากระบบ ฟอสฟอรัสจึงถูกกำจัดออกไปด้วย [7-9]

จากการศึกษาของ Kee et al [10] พบว่าการกำจัดฟอสเฟตมีประสิทธิภาพที่อัตราส่วน CH_3COOH ต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 10:1 ในการศึกษาของ Alistair et al [11] ที่อัตราส่วน COD:P เป็น 15:1 ระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่าร้อยละ 99 ส่วนการศึกษาของ Carlota et al; Shaomei et al [12-13] ใช้อัตราส่วน COD:P เท่ากับ 20:1 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 98 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของ COD:P มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส และในงานวิจัยของ Seyoum et al [7] ได้ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสโดยระบบ SBR ด้วยกระบวนการแบบ EBPR ซึ่งได้มีการศึกษาอัตราส่วนของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันของกลูโคส และ acetate อัตราส่วนร้อยละ 25/75 , 50/50 , 75/25 และ 100 ของกลูโคสและ acetate พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบนี้มีค่าสูงที่อัตราส่วน กลูโคสต่อ CH_3COONa ร้อยละ 25/75 , 50/50 และ CH_3COONa ร้อยละ 100 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงถึงร้อยละ 99.8 แสดงให้เห็นถึงชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกันก็มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเช่นกัน

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมหรือชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เพื่อใช้ในการควบคุมระบบในการกำจัดฟอสฟอรัส

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การดำเนินการทดลอง

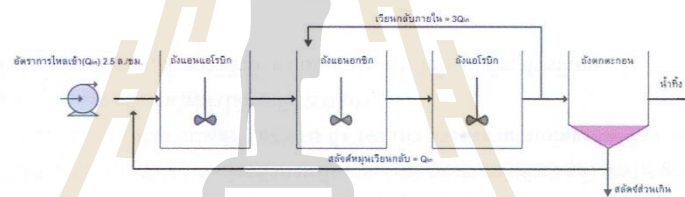
2.1.1 ออกแบบชุดการทดลอง ตั้งเก็บน้ำเสียสังเคราะห์ขนาด 100 ลิตร โดยมีเครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบปริคสาย (peristaltic pump) อัตราการไหลเข้าสู่ระบบ 60 ลิตร/วัน ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time, HRT) 12 ชั่วโมง กำหนดอัตราการสูบตะกอน

เวียนกลับ 60 ลิตร/วัน เพื่อรักษาปริมาณตะกอนในระบบให้สม่ำเสมอ น้ำเสียจะถูกสูบเข้าสู่ถังตั้งแอนแอโรบิก และไหลสู่ถังแอนอ็อกซิก และถังแอโรบิก ปริมาตร 5, 5 และ 20 ลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 1) และตามด้วยถังตกตะกอน

ตารางที่ 1 ค่า HRT และปริมาตรแต่ละถังของระบบ EBPR

ถังปฏิกริยา	HRT (ชั่วโมง)	ปริมาตรถัง (ลิตร)	การสูบตะกอนเวียนกลับ	การเวียนกลับภายใน
แอนแอโรบิก	2	5	60 ลิตร/วัน	180 ลิตร/วัน
แอนอ็อกซิก	2	5		
แอโรบิก	8	20		

2.1.2 นำจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำอัดลม บริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) ตำบลปรุใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา มาเติมในถังแอนแอโรบิก, ถังแอนอ็อกซิก, ถังแอโรบิก เพื่อเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ EBPR ซึ่งจะมีการเดินระบบ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 กระบวนการกำจัดสารอาหารทางชีวภาพแบบ EBPR

2.2 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบ 4 สูตร ที่มี COD:P และแหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกัน ดำเนินการทดลองเป็นช่วงเวลาดังนี้ สูตรอาหารที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 8/7/2559 จนถึงวันที่ 8/8/2559 (32 วัน) กำหนดให้ COD เข้าระบบ 500 มก/ล. ซึ่งมาจากสองแหล่ง คือ CH_3COOH 125 มก/ล. และ glucose 200 มก/ล. โดยให้ฟอสฟอรัสเข้าระบบเป็น 30 มก/ล. สัดส่วน COD:P = 16.67:1 คัดแปลงมาจากงานวิจัยของ คมสัน [14]

สูตรอาหารที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 9/8/2559 จนถึงวันที่ 25/8/2559 (17 วัน) กำหนดให้ COD เข้าระบบ 500 มก/ล. ซึ่งมาจากสองแหล่งคือ CH_3COOH 125 มก/ล. และ glucose 375 มก/ล. โดยให้ฟอสฟอรัสเข้าระบบเป็น 12.5 มก/ล. สัดส่วน COD:P = 40:1 คัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Javier et al [3]

สูตรอาหารที่ 3 ตั้งแต่วันที่ 26/8/2559 จนถึงวันที่ 5/9/2559 (11 วัน) ใช้แหล่งคาร์บอนที่มาจาก CH_3COOH 375 มก/ล. และ glucose 125 มก/ล. โดยให้ฟอสฟอรัสเข้าระบบเป็น 25 มก/ล. สัดส่วน COD:P = 20:1 คัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Carlota et al; Shaomei et al [12-13]

สูตรอาหารที่ 4 ตั้งแต่วันที่ 6/9/2559 ถึงวันที่ 31/10/2559 (56 วัน) กำหนดให้ COD เข้างระบบ 500 มก./ล. จาก CH_3COONa และฟอสฟอรัสเข้างระบบ 25 มก./ล. สัดส่วน COD:P = 20:1 คัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Carlota et al; Shaomei et al [12-13] และ วาสนา [15] (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 สรุปความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเลี้ยงสังเคราะห์ช่วงที่ 1 - 4

สารเคมี	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
CH_3COOH	300 มก.ซีไอดี/ล.	125 มก.ซีไอดี/ล.	375 มก.ซีไอดี/ล.	-
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	200 มก.ซีไอดี/ล.	375 มก.ซีไอดี/ล.	125 มก.ซีไอดี/ล.	-
CH_3COONa	-	-	-	500 มก.ซีไอดี/ล.
H_3PO_4	30 มก. ฟอสฟอรัส/ล.	12.5 มก. ฟอสฟอรัส/ล.	25 มก. ฟอสฟอรัส/ล.	-
KH_2PO_4	-	-	-	25 มก. ฟอสฟอรัส/ล.
KCl	18.87 มก./ล.			-
NH_4Cl	15 มก. ไนโตรเจน/ล.			
NaHCO_3	420 มก./ล.			
FeCl_3	7.2 มก./ล.			
MgSO_4	28.8 มก./ล.			63.2 มก./ล.
CaCl_2	26.5 มก./ล.			34.5 มก./ล.

2.3 วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราส่วนของ COD:P ที่เหมาะสมให้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบ EBPR เพื่อประเมินประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ซึ่งพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ และความถี่ในการเก็บ

พารามิเตอร์	วิธีการ/เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่
pH	pH meter	ทุกวัน
Temperature	Thermometer	
SCOD	Close reflux method	
Ortho-phosphate	Vanadate molybdophosphoric acid	
NH_3	Nesslerization	
TKN	Kjeldahl method	
Nitrate, Nitrite	Colorimetric method	
Solid (TS, MLSS, MLVSS)	Gravimetric method	สัปดาห์ละครั้ง
BOD	Dilution method	

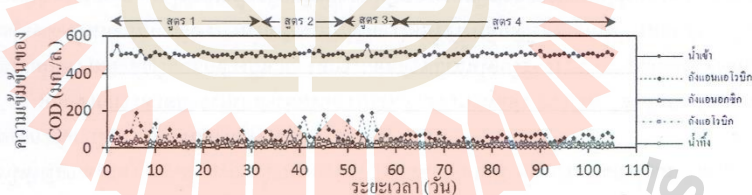
โดยการเก็บตัวอย่าง (ตารางที่ 3) จะนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าบีโอดีละลาย (Soluble Biological Oxygen Demand, SBOD), ค่าซีโอดีละลาย (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD), แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen, NH₃), ไนเตรท (NO₃⁻), ไนไตรท์ (NO₂⁻), ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN), ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS), ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS), ออโรฟอสเฟต (Ortho-phosphorus) นอกจากนี้จะทำการวิเคราะห์ MLSS ในถังจนกระทั่งระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วิธีการวิเคราะห์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย (ตารางที่ 3) อ้างอิงจาก Standard Method for examination of water and wastewater [16]

3. การทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองนี้ แบ่งออกเป็น 4 สูตร ที่มีอัตราส่วนของ COD:P ที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพดังนี้

3.1 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ในระบบ EBPR

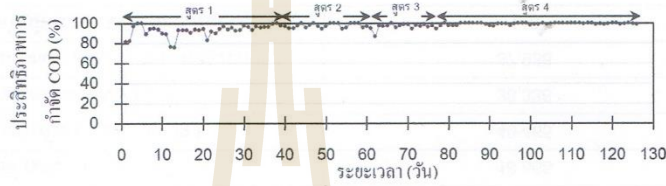
พบว่าทั้ง 4 สูตรมีความเข้มข้นของ COD ที่เข้าระบบเท่ากับ 500 มก./ล.พบว่าสูตรที่ 1, 2, 3 และ 4 มีความเข้มข้น COD ในน้ำทิ้ง 0 - 30, 0 - 25, 0 - 28 และ 0 - 28 มก./ล. (รูปที่ 2) ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (COD ไม่เกิน 120 มก./ล.) [3] ทั้งหมด และในการเดินระบบด้วยสูตร 1, 2, 3 และ 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD อยู่ในช่วงร้อยละ 75 - 100 (รูปที่ 3) แสดงว่าจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแต่ละถังปฏิบัติการจุลินทรีย์มีการใช้สารอาหารในการเจริญเติบโต จึงทำให้ COD ที่เป็นแหล่งคาร์บอนลดลง โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ย่อยง่าย เช่น CH₃COOH จะทำให้ PAOs สามารถใช้สารอินทรีย์คาร์บอนได้ง่ายขึ้น ระบบจึงสามารถกำจัด COD ได้ แม้ว่าจะมีอัตราส่วนของ COD:P ที่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคมสัน [14] ที่ได้ศึกษาพลวัตของประชากรจุลินทรีย์ในระบบ EBPR ซึ่งใช้อัตราส่วน COD:P ที่แตกต่างกันเท่ากับ 60:1, 30:1, 20:1, 10:1, 5:1, และ 3:1 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD มีค่าประมาณร้อยละ 90 ทุกชุดการทดลองที่อัตราส่วน COD:P ต่าง ๆ แม้ว่าจะมีอัตราส่วนของ PAOs และ GAO ต่างกัน เนื่องจากจุลินทรีย์ทั้งสองมีอัตราการดูดซับสารอินทรีย์ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ COD ในระบบกับระยะเวลา

อธิบายได้ว่าสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ถังแอมโมเนียไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดผลิตภัณฑ์เป็น CO₂, H₂O และ CH₄ ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนได้สูงที่สุด จากนั้นสารอินทรีย์ที่เหลือเมื่อเข้าสู่ถังแอมโมเนียไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยา Denitrification เกิดการกำจัด NO₃⁻ โดยเปลี่ยนเป็น N₂ จะเกิดการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนด้วย และสุดท้าย

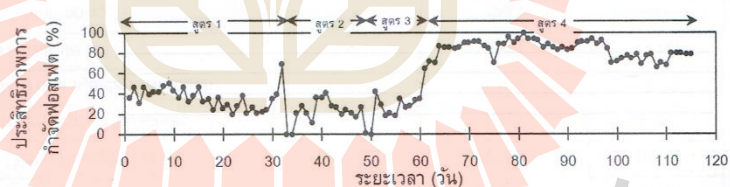
สารอินทรีย์ที่เหลือจะถูกกำจัดด้วยปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน โดยใช้ออกซิเจนในการเปลี่ยนสารอินทรีย์คาร์บอนเป็น CO_2 , H_2O และพลังงานในการเจริญเติบโต



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัด COD กับระยะเวลาการเดินระบบ

3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบ EBPR

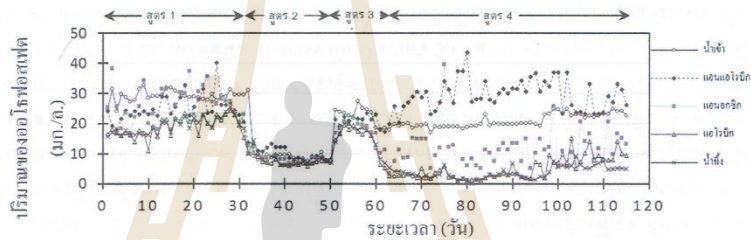
จากการทดลองสูตรที่ 1, 2 และ 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำ (ร้อยละ 0 - 65) โดยมีอัตราส่วน COD:P อยู่ที่ 16.67:1, 40:1 และ 20:1 ตามลำดับ แต่สูตรที่ 4 มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงที่สุดประมาณร้อยละ 80 - 99 ซึ่งสูตรที่ 4 มีอัตราส่วน COD:P เท่ากับ 20:1 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shun et al [17] ที่ได้ศึกษาผลของคาร์บอนที่แตกต่างกันในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดยใช้กลูโคส สารละลายจากนมหมัก และ CH_3COONa ในระบบแอนแอโรบิก-เอโรบิก พบว่าความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ 1 มก./ล. ในน้ำทิ้ง และมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงถึงร้อยละ 98 เมื่ออัตราส่วนของ COD:P มากกว่า 18 - 20 และพบว่าที่อัตราส่วน COD:P มากกว่า 25:1 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะลดลง โดยไม่ขึ้นกับแหล่งคาร์บอน แต่ผลแตกต่างจากการศึกษาที่แหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน เนื่องจากพบว่ากลูโคสและสารละลายที่ได้จากการหมักมีประสิทธิผลดีกว่า CH_3COONa



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตกับระยะเวลาการเดินระบบแต่ละสูตรอาหาร

การศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhijian et al [18] ซึ่งพบว่ามากกว่า 2 ใน 3 ของระบบบำบัดที่ไม่ประสบความสำเร็จในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งให้ต่ำกว่า 0.5 มก./ล. เนื่องจากอัตราส่วน COD:P ที่สูงเกินไป (28.6 - 196.2) อย่างไรก็ตามสูตรที่ 3 และ 4 แม้ว่าจะมีอัตราส่วน COD:P เท่ากัน แต่มีแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนแตกต่างกัน โดยสูตรที่ 3 ใช้ CH_3COOH ต่อกับกลูโคสเป็น 3:1 ส่วนสูตรที่ 4 ใช้ CH_3COONa เป็นแหล่งคาร์บอนทั้งหมด ซึ่งจากการพิจารณาพบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นปัจจัยที่มีผล

ต่อการทำงานของ PAOs ในระบบ EBPR โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนทั้งหมดเป็นกลูโคส หรือมีปริมาณของ กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (สูตร 1, 2 และ 3) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำ (ร้อยละ 0 - 50) สอดคล้องกับ งานวิจัย Javier et al [19] ที่พบว่าการใช้แหล่งคาร์บอนทั้งหมดเป็นซูโครส(C₁₂H₂₂O₁₁) จะทำให้ระบบ EBPR สัมผลอย่างรวดเร็ว ซึ่งซูโครสประกอบด้วย ฟรุกโทส (fructose) และกลูโคส ส่วนการใช้ CH₃COONa ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง (ร้อยละ 80 - 99) เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย (VFAs) ที่ PAOs สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างพลังงานได้ง่ายจึงสามารถ กำจัดฟอสฟอรัสได้สูง ซึ่งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Javier et al [8] ที่ได้ศึกษาอัตราส่วนของกลูโคสและ CH₃COONa ที่ อัตราส่วนต่างๆในระบบ SBR พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ CH₃COONa เพิ่มถึงร้อยละ 100 ที่อัตราส่วน COD:P เท่ากับ 23.5:1 ระบบ สามารถกำจัดฟอสเฟตได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 ปริมาณของฟอสเฟตในระบบกับระยะเวลา

Dong et al [20] ได้ศึกษา HRT ที่ต่างกัน (7.5, 6, 4.5 และ 3.2 ชั่วโมง) โดยมีอัตราส่วน COD:P เท่ากับ 20:1 มีค่า MLSS เท่ากับ 6,000 มก./ล. ซึ่งพบว่าที่ HRT มากกว่า 6 ชั่วโมง ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าร้อยละ 95 และมีฟอสเฟตใน น้ำที่น้อยกว่า 0.5 มก./ล. ซึ่งสอดคล้องในงานวิจัยที่มีค่า MLSS เท่ากับ 4,370 มก./ล. ในถังเดิมอากาศ และ HRT ทั้งหมดอยู่ที่ 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตเฉลี่ยร้อยละ 87.97 ซึ่งอธิบายได้ว่า HRT สั้นๆ จะทำให้ PAOs มีเวลาไม่มากพอในการ สังเคราะห์สารอินทรีย์ให้เป็น PHAs ในสภาวะแอมโมเนียม และเมื่ออยู่ในสภาวะแอมโมเนียมจะเกิดการสลาย PHAs ในสภาวะที่มี ออกซิเจนละลายเพียงพอ ซึ่งจะเกิดเป็นพลังงานที่ใช้ในการสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ โดยมีเพียงกลุ่ม PAOs ที่สามารถสะสม PHAs ได้ โดยเมื่อใช้ CH₃COONa เป็นแหล่งคาร์บอนช่วยให้ PAOs สามารถสะสม PHAs ไว้ในเซลล์ได้ง่ายกว่าชนิดอื่น ซึ่งผลการ ทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณฟอสเฟตในน้ำที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ที่กำหนดให้ปริมาณ ฟอสเฟตในน้ำทิ้งไม่เกิน 2 มก./ล. [2] ซึ่งในสูตรที่ 4 เมื่อต้องการกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในช่วงที่ระบบมี ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสได้สูงกว่าร้อยละ 89.95

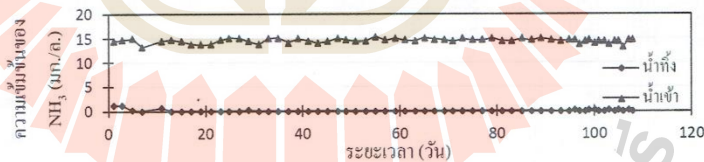
จากสูตรที่ 2 และ 3 มีระยะเวลาในการเดินระบบต่ำกว่าค่า SRT เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในช่วงนี้ต่ำมาก สังเกตจากแนวโน้มในช่วงสูตรที่ 1 พบว่าเดินระบบ 32 วัน แต่ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสยังไม่เพิ่มสูงขึ้น และเห็นว่าทั้ง สูตร 1, 2 และ 3 ไม่เกิดการคายฟอสฟอรัสในถังแอมโมเนียม ซึ่งในสูตรที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเดินระบบด้วยสภาวะที่เหมาะสม แล้วจะเกิดการคายฟอสเฟตในถังแอมโมเนียม และเกิดการใช้ฟอสเฟตทั้งในถังแอมโมเนียมและไนโตรเจน ซึ่งปริมาณสารอาหาร

อื่น ๆ ที่อาจจะมีผลต่อการเดินระบบ เช่น Ca^{2+} และ Mg^{2+} แต่ในการเดินระบบนี้ (ช่วง 26.5 – 34.5 มก./ล.) ไม่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส แต่เป็นสารอาหารเสริมที่อาจมีผลต่อการช่วยให้จุลินทรีย์เจริญเติบโต อธิบายได้จากปริมาณของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในสูตรที่ 3 และ 4 มีปริมาณเท่ากัน แต่สูตรที่ 3 ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มสูงเท่าสูตรที่ 4 ซึ่งจากงานวิจัยของ H.-L. Zhang et al [21] พบว่า Ca^{2+} เป็นสารที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตกตะกอน, การสังเคราะห์ poly-P ภายในเซลล์ และยังพบว่า Ca^{2+} ที่ความเข้มข้นสูง (> 79 มก./ล.) จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงการเผาผลาญอาหารของจุลินทรีย์ในกลุ่ม PAOs

ในการใช้แหล่งคาร์บอนจาก CH_3COONa และ KH_2PO_4 ในสูตรที่ 4 เนื่องจากการควบคุมการเปลี่ยนแปลง pH ในระบบ ซึ่ง Oehmen et al [22] ได้อธิบายว่า PAOs ต้องการช่วง pH 7 - 8.5 ในการเจริญเติบโต ซึ่งสูตรที่ 1 และ 3 มีช่วง pH ในแคระดังอยู่ที่ 6.87 - 8.07 และ 6.4 - 8.5 ซึ่งมี pH ต่ำ และเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง pH ที่กว้าง อาจส่งผลกระทบต่อปรับตัว และการเจริญเติบโตของ PAOs ส่วนสูตรที่ 2 และ 4 มีช่วง pH อยู่ที่ 6.87 - 8.07 และ 7.2 - 8.3 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย และอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในสูตรที่ 4 สูงกว่า เนื่องจากมีปริมาณของสาร CH_3COONa ร้อยละ 100 แต่สูตรที่ 2 มีปริมาณ CH_3COOH เพียงร้อยละ 25 แม้ว่าจะเป็นสารที่ย่อยสลายง่ายเหมือนกัน แต่ถ้าปริมาณแตกต่างกัน หรือไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลง pH ได้ จะทำให้ระบบไม่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนเป็น CH_3COONa เหมาะสมในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมากที่สุด สรุปได้ว่าแหล่งอาหารที่ต่างกันมีผลต่อการปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก และการจับฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิก ซึ่งก็เป็นผลมาจากอัตราส่วนของ COD:P ปริมาณของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย และค่า pH

3.3 ประสิทธิภาพการกำจัด NH_3 ในระบบ EBPR

พบว่า NH_3 ที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 14 - 16 มก./ล. และความเข้มข้นน้ำทิ้งของ NH_3 น้อยกว่า 1 มก./ล. (รูปที่ 6) เนื่องจากในระบบเกิดปฏิกิริยา Nitrification และ Denitrification รวมถึงการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบ EBPR ด้วย โดยความเข้มข้นที่ลดลงเกิดการปฏิกิริยา Nitrification ทำให้ NH_3 เปลี่ยนรูปเป็น NO_2^- และ NO_3^- ในสภาวะที่มีออกซิเจนในถังเดิมอากาศ ซึ่งผลการทดลองแสดงถึงปริมาณของออกซิเจนเพียงพอต่อการบำบัด NH_3 ซึ่งจากงานวิจัยของ Xiongliu et al [23] พบว่าเกณฑ์ที่เป็นพิษของความเข้มข้น FA (nitrate and ammonium/free ammonia) สำหรับการเผาผลาญฟอสฟอรัส เท่ากับ 17.76 มก. ไนโตรเจน/ล.

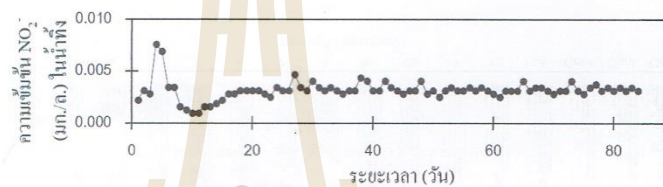


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของ NH_3

3.4 ประสิทธิภาพการกำจัด NO_2^- และ NO_3^- ในระบบ EBPR

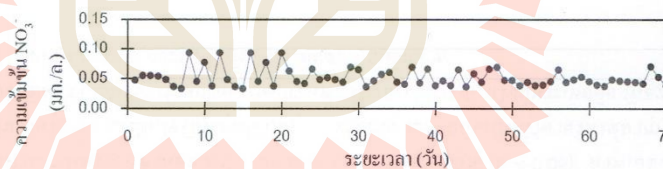
พบว่าความเข้มข้นของ NO_2^- ในสภาวะแอนแอโรบิก แอนอกซิก แอโรบิก และน้ำทิ้งมีค่าน้อยกว่า 0.01 มก./ล. (รูปที่ 7) เมื่ออยู่ในสภาวะแอโรบิก NO_2^- จะถูกเปลี่ยนเป็น NO_3^- แสดงให้เห็นว่าปริมาณออกซิเจนละลาย 3 - 4 มก./ล. เพียงพอในการกำจัด NO_2^-

ซึ่งพบว่า PAOs สามารถลด NO_2^- ภายใต้สภาวะแอโรบิกที่มีออกซิเจนละลาย 3 มก./ล. และมี FNA (nitrite/free nitrous acid) เพิ่มขึ้นในทางกลับกันจะยับยั้งการดูดซึมฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกได้ [23] ในงานวิจัยของ Carlota et al [12] ได้ศึกษา NO_2^- ที่มีผลต่อการแข่งขันของ PAOs และ GAOs โดยใช้โพรพิโอเนต (propionate) เป็นแหล่งคาร์บอน และเพิ่ม NO_2^- 3,500 มก. ในโตรเจน/ล. ในถังแอนอซิก ใช้อัตราส่วน COD:P เป็น 20:1 พบว่าจากตะกอนที่มี GAOs ร้อยละ 70 สามารถเปลี่ยนเป็น PAOs ร้อยละ 85 ได้ โดยใช้ NO_2^- เป็นปัจจัยสำคัญ แสดงว่า NO_2^- ในระบบมีผลต่อการแข่งขันของ PAOs และ GAOs



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับความเข้มข้นของ NO_2^- ในน้ำทิ้ง

โดยงานวิจัยของ Ye et al [24] ศึกษาผลของ FNA ต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของ GAOs ซึ่งใช้ CH_3COONa เป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าหากมี NO_2^- 6.3 มก./ล. ที่ pH เท่ากับ 7 จะส่งผลให้ GAOs หยุดทำงานไปร้อยละ 50 และ GAOs จะหยุดการเจริญเติบโตเมื่อความเข้มข้นของ FNA มากกว่า 7.1×10^{-3} มก./ล. (NO_2^- 30 มก. ในโตรเจน/ล.) แต่ในสภาวะแอโรบิก FNA ก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานของ PAOs มากกว่า GAOs และสามารถยับยั้งทั้งกระบวนการ anabolic (การเจริญเติบโต, การดูดซึมฟอสเฟตและผลิตโกลโคเจน) และ catabolic (ออกซิเดชันของ PHAs) ของ PAOs ได้ ซึ่งสามารถพิจารณาพร้อมกับค่า pH ถ้ามี pH สูงจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตทั้ง PAOs และ GAOs [22] ซึ่งการศึกษากครั้งนี้ pH ในระบบอยู่ที่ 6.8 - 8.2



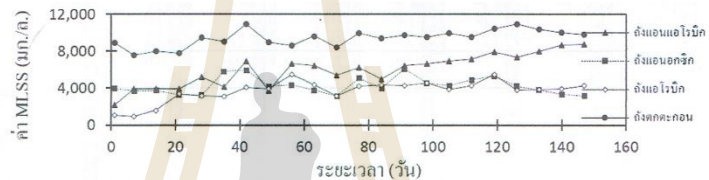
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับความเข้มข้นของ NO_3^- ในน้ำทิ้ง

พบว่าความเข้มข้นของ NO_3^- ในน้ำทิ้งมีค่าน้อยกว่า 0.1 มก./ล. (รูปที่ 8) ระบบ EBPR สามารถกำจัด NO_3^- ได้โดยอาศัยสภาวะแอนอซิก ซึ่งจะใช้ NO_3^- เป็นตัวรีดออกซิเจน และเปลี่ยน NO_3^- เป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) ซึ่งในระบบจะมีการเวียนกลับน้ำที่ออกจากถังแอโรบิกด้วยอัตราการไหล 3 เท่าของน้ำเข้า ไปยังถังแอนอซิก เพื่อให้สามารถเวียนกลับน้ำไปยังถังแอนอซิกได้พอที่จะกำจัด NO_3^- ไม่ให้หลุดออกไป ซึ่ง Maite et al [25] กล่าวว่า ถ้าพบ NO_3^- ในสภาวะแอโรบิก จะยับยั้งการทำงานของ PAOs หรือ

เกิดการแข่งขันของ PAOs กับดีไนทริฟิเคชันที่เร็วได้ ซึ่งผลการทดลองไม่พบ NO_3^- ในสภาวะแอนแอโรบิก ส่งผลให้ NO_3^- ไม่มีผลในการยับยั้ง PAOs ในระบบ

3.4 ค่า MLSS ในการเดินระบบ EBPR

พบว่าค่า MLSS ดังแอนแอโรบิก, แอนอกซิก, แอโรบิก และดังตกตะกอนมีค่า 5,000 - 8,500, 3,000 - 5,500, 3,000 - 5,000 มก./ล. และ 7,500 - 10,000 มก./ล. ตามลำดับ โดยค่า MLSS จะสามารถบอกความเข้มข้นจุลินทรีย์ (MLVSS) ในระบบได้ จากการทดลองพบว่าค่า MLVSS เป็น 0.72 - 0.84 เท่าของ MLSS ซึ่งปริมาณของจุลินทรีย์มีความสำคัญกับการเดินระบบ เกี่ยวกับความเข้มข้นของสารอาหารในแต่ละถัง คือค่า F/M ต้องมีค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MLSS กับระยะเวลาในการเดินระบบ

โดยการทดลอง ค่า F/M ratio ดังแอนแอโรบิก แอนอกซิก และแอโรบิก มีค่าอยู่ในช่วง 0.8 - 0.5, 1 - 0.5 และ 0.8 - 0.3 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเป็นค่าที่เหมาะสมในการบำบัดเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ ช่วงหลังวันที่ 140 จะเห็นว่าที่ดังแอนแอโรบิกมีปริมาณ MLSS สูงถึง 8,500 ซึ่งใกล้เคียงกับ MLSS ในดังตกตะกอน เนื่องจากใบกวนในดังแอนแอโรบิกเกิดปัญหาทำให้ตะกอนที่อุ้งในถังไม่ทิ้งกระจาย และมีปริมาณของตะกอนอัดแน่นเกิดขึ้น ซึ่งยังคงควบคุม SRT เท่ากับ 20 วัน

4. สรุป

จากการศึกษาทดลองการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการ EBPR พบว่าการทดลองทั้ง 4 ช่วงมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ประมาณ 90% แต่สูตรอาหาร ที่ 1, 2 และ 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำ (0 - 65%) เมื่อเทียบกับช่วง 4 ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดประมาณร้อยละ 90 - 99 ซึ่งใช้แหล่งคาร์บอนเป็น CH_3COONa และมีสัดส่วน COD:P เท่ากับ 20:1 เหมือนกับช่วงที่ 3 แต่ต่างกันที่ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ใช้ แสดงให้เห็นความแตกต่างของสารอินทรีย์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของ PAOs โดยสรุปว่า PAOs มีความสามารถในการเปลี่ยนกลูโคสมาสะสมเป็นพลังงานในรูป PHAs ได้ต่ำกว่า CH_3COONa เนื่องจากจุลินทรีย์ประเภทนี้สามารถเจริญเติบโตได้ดีในอาหารที่มีโมเลกุลเล็ก และย่อยสลายได้ง่าย แม้กลูโคสจัดเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กและย่อยสลายได้ง่าย ที่ PAOs สามารถดูดซึมและย่อยสลายกลูโคสได้ แต่การเปลี่ยนรูปกลูโคสเป็นสาร PHAs ในเซลล์ PAOs ไม่สามารถทำได้โดยง่าย เช่นเดียวกับการใช้แหล่งคาร์บอนเป็น CH_3COONa ซึ่งเหมาะที่จะเปลี่ยนเป็นสาร PHAs ได้โดยตรง

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก “ทุนกิตติบัณฑิตร” ปีการศึกษา 1/2558 สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.นิตยา บุญเทียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนและให้คำปรึกษาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบพระคุณบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้จุดยืนหรือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ministry of natural resource and environment. *Domestic wastewater treatment system*. Available from: <http://mews.onep.go.th/default.aspx> [Accessed 16 March 2016]. (In Thai)
- [2] Pollution Control Department Ministry of Natural Resources and Environment. *Announcement of the pollution control department. Design criteria of wastewater collection and integrated wastewater system of domestic*, 2010 (In Thai)
- [3] Javier, G. *et al.* Controlled crude glycerol dosage to prevent EBPR failures in C/N/P removal WWTPs. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 271, pp. 114-127.
- [4] Yan, W. *et al.* The effect of poly-b-hydroxyalkanoates degradation rate on nitrous oxide production in a denitrifying phosphorus removal system. *Bioresour Technol*, 2014, 170, pp. 175-182.
- [5] Randeng, W. *et al.* Understanding the role of extracellular polymeric substances in an enhanced biological phosphorus removal granular sludge system. *Bioresour Technol*, 2014, 169, pp. 307-312.
- [6] Welawi Chaiyaphan. Study of microbial community and the possibility on saline enhanced biological phosphorus removal using sequencing batch reactor system. In: *Proceedings of 45th Kasetsart University Annual Conference. Master of science degree in biology*, Bangkok, 30 - 2 Feb 2007. (In Thai)
- [7] Seyoum, Y.G. *et al.* Effects of glucose on the performance of enhanced biological phosphorus removal activated sludge enriched with acetate. *Bioresour Technol*, 2012, 121, pp. 19-24.
- [8] Javier, G. *et al.* Glycerol as a sole carbon source for enhanced biological. *Water research*, 2012, 46(9), pp. 2983-2991.
- [9] Thongchai Punsawad. Biological of nitrogen and phosphorus removals. *1st. Environmental Engineering Association of Thailand*, Bangkok, 2544. (In Thai)
- [10] Kee, F.L. *et al.* Kinetic and stoichiometric characterization for efficient enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process at high temperatures. *Bioprocess Biosyst Eng*, 2015, 38, pp. 729-737.
- [11] Alistair, B. *et al.* Enhanced biological phosphorus removal for high-strength wastewater with a low rbCOD:P ratio. *Bioresour Technol*, 2008, 99(5), pp. 1236-1241.
- [12] Carlota, T. *et al.* The selective role of nitrite in the PAO/GAO competition. *Chemosphere*, 2013, 93, pp. 612-618.
- [13] Shaomei, H. and Katherine, D. M. Microbiology of 'Candidatus Accumulibacter' in activated sludge. *Microbial Biotechnology*, 2011, 4(5), pp. 603-619.
- [14] Komsan Lapapairoj. *Proportion of Microbial Population in an EBPR System at Different P:COD Ratio*, Bangkok, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2003. (In Thai).
- [15] Vasana Pectamnongsin. Comparison of uptake phosphorus under aerobic and anoxic condition in biological phosphorus removal process at different solid retention time. *Environment Technology*, 1996. (In Thai)
- [16] APHA., AWWA., WPCF., Eaton, A. D. and Franson, M. Ann H., (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. Washington DC: USA, 2005.

- [17] Shun, H. C. *et al.* Effects of different carbon supplements on phosphorus removal in low C/P ratio industrial wastewater. *Bioresource Technology*, 2011, 102, pp. 5461–5465.
- [18] Zhijian, Z. *et al.* Improvement strategy on enhanced biological phosphorus removal for municipal wastewater treatment plants: Full-scale operating parameters, sludge activities, and microbial features. *Bioresource Technology*, 2011, 102(7), pp. 4646–4653.
- [19] Javier, G. *et al.* The nature of the carbon source rules the com-petition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal. *Water Research*, 2011, 45(16), pp. 4793–802.
- [20] Dong, L. *et al.* Optimized hydraulic retention time for phosphorus and COD removal from synthetic domestic sewage with granules in a continuous-flow reactor. *Bioresource Technology*, 2016, 216, pp. 1083–1087.
- [21] Hai-Ling, Z. *et al.* Calcium effect on the metabolic pathway of phosphorus accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems. *Water Research*, 2015, 84, pp. 171-180
- [22] Oehmen, A. *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale. *Water Research*, 2007, 41, pp. 2271-2300.
- [23] Xiongliu, Z. *et al.* Inhibition of free ammonia to the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the recoverability. *Bioresource Technology*, 2013, 148, pp. 343–351.
- [24] Ye, L. *et al.* The effect of free nitrous acid on key anaerobic pro-cesses in enhanced biological phosphorus removal systems. *Bioresource Technology*, 2013, 130, pp. 382–389.
- [25] Maite, P. *et al.* Free nitrous acid inhibition on the aerobic metabolism of poly-phosphate accumulating organisms. *Water research*, 2010, 44(20), pp. 6063–6072.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากแป้งมันสำปะหลัง
OPTIMIZATION OF CASSAVA DECANTER CAKE BIOGAS PRODUCTION

อุษา อึ้งชล¹ นิตยา บุญเทียน² ฉัตรลดา เพ็ชร์ชัย³ และ Htay Aung Pyae⁴

^{1,3,4}นักศึกษานิติศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี/สำนักวิศวกรรมศาสตร์

²อาจารย์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี/สำนักวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยสารกรดและด่าง เพื่อสลายพันธะและสลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ในรูปของน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหย ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 1.67%TS และ 5%TS ผลการศึกษาพบว่าสภาวะการไฮโดรไลซิสที่ pH 2, อุณหภูมิ 100 °C, และทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนการหมัก ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5%TS ให้การผลิตก๊าซชีวภาพสูงถึง 0.1757 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้งระเหย เมื่อเทียบกับสภาวะที่ให้การผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 1.67%TS ที่ให้การผลิตก๊าซชีวภาพ 0.0027 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้งระเหย จะพบว่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 5%TS สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายในรูปของก๊าซหุงต้มและพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าที่ความเข้มข้น 1.67%TS ถึง 65 เท่า

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ, กากมันสำปะหลัง, ไฮโดรไลซิส, ก๊าซมีเทน, น้ำตาลรีดิวซ์

ABSTRACT

The optimization of biogas production from cassava pulp through hydrolysis with acid and base to breakdown the bond cellulose, hemicellulose and lignin in the form of volatile fatty acids and reducing sugars. The maximum rate of biogas yield was found at the cassava pulp concentration of 1.67%TS and 5%TS. In the study, conditions of hydrolysis were at pH 2, Temp 100 °C, and 30 mins reaction time before fermentation. Cassava pulp of 5%TS produced biogas yield as high as 0.1757 m³/kg TVS. The conditions for the biogas digesters with 1.67%TS produced biogas yield as 0.0027 m³/kg TVS. It was found that biogas production rate of cassava pulp the concentration of 5%TS, can be alternative for decrease cost of LPG and electric energy more than the concentration of 1.67%TS by 65 times.

KEYWORDS: Biogas; Cassava decanter cake; Hydrolysis; Methanogens; Reducing sugar

Usa Yingchon¹ Nittaya Boontian² Chatlada Piasai³ and Htay Aung Pyae⁴

^{1,2,3,4}School of Environmental Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000.

1. บทนำ

กากมันสำปะหลังเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมัน เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีปริมาณแป้งสูง [1] คาดว่ากากมันสำปะหลังน่าจะมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี เพื่อให้การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังมีประสิทธิภาพสูงสุด Kaparaju et al. [2] จึงมีการหาสภาวะที่เหมาะสม จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากแป้งสาลี โดยใช้ถังหมักแบบ Upflow anaerobic sludge blanket, UASB ทำการลองในช่วง Thermophilic โดยทดลองที่อุณหภูมิ 55 °C ระยะเวลาในการกักเก็บ 2 วัน มีค่า volatile solids, VS 324 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแปรผันความเข้มข้นของกากแป้งสาลีที่ 12.8 - 25.6 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร ผลที่เหมาะสมที่สุดมีค่า Organic loading rate, OLR 17.1 กรัมชีโอดีต่อลิตร-วัน ที่ความเข้มข้นของ Substrate 25% เมื่อลองเพิ่ม OLR เป็น 41.2 กรัมชีโอดีต่อลิตร-วัน ความเข้มข้นของ Substrate 23 - 50% พบว่าเกิดการเกิดก๊าซมีเทนต่ำลงแสดงว่าการที่เชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนได้รับสารอาหารที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็จะทำให้ระบบผลิตก๊าซมีเทนไม่ดี ในเวลาต่อมา พิซซา สวอสม [3] ทำการศึกษาหาสภาวะของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบโดยการแปรผันร้อยละของกากมัน คือ 2,3,5 และ 10% น้ำหนักต่อน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการให้ความร้อนกับกากมันหรือการใช้เอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์เพคตินเนสก่อนการหมักด้วย ผลการศึกษาพบว่าร้อยละของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ คือ 2 - 3% ซึ่งให้อัตราการผลิตก๊าซคือ 0.034 - 0.047 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก การให้ความร้อนกับส่วนผสมกากมันสำปะหลัง 2% ที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 120 °C นาน 30 นาที ผลการศึกษาพบว่า การให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น มีผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพน้อย เนื่องจากโครงสร้างที่จำกัดของกากมันสำปะหลัง

เนื่องจากโครงสร้างหลักของกากมันสำปะหลังประกอบด้วยลิกโนเซลลูโลส และซาคคาไรด์ที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายได้ไม่สมบูรณ์ในเวลาที่ยำกัก อัตราการสร้างก๊าซจึงต่ำ [3] ในงานวิจัยของ Antonopoulou et al. [4] ได้ศึกษาการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายให้สั้นลง โดยใช้หิวมันฝรั่งมาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น ใช้อุณหภูมิ 120 °C อัตราส่วน 5% น้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงขึ้นเมื่อใช้กรดความเข้มข้นสูง โดยให้ค่าสูงสุด 175 กรัมต่อกิโลกรัมหิวมันฝรั่ง แต่เมื่อเข้าสู่สภาวะในการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดที่อุณหภูมิสูงทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง เนื่องจากมีส่วนของ เฟอร์ฟิวรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัลเกิดขึ้น ซึ่งยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ [4] ต่อมา กิตติกันท์ สุขวานิชย์ [5] ได้ทำการเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและค่า ใช้อัตราส่วนสารละลายกรดหรือค่าต่อกากมันสำปะหลัง เท่ากับ 8:1 หรือสารละลายกรด ค่า 350 มิลลิกรัม ต่อกากมันสำปะหลัง 43.75 กรัม โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากถัง UASB ของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟาร์มสุกร ผลจากการศึกษาพบว่า pH ของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมรรถนะการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยสารกรดและสารต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหย คือ การไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ค่า pH 0.38 อุณหภูมิ 100 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยเท่ากับ 855.00 และ 60.30 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยถึง 214 และ 20 เท่า จากระดับเริ่มต้น ในส่วนของการไฮโดรไลซิสด้วยค่าพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดมีค่าต่ำกว่าของการไฮโดรไลซิสด้วยกรดอย่างมาก สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าที่ pH 13 อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 90 นาที ก่อนนำไปหมักก๊าซ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างเด่นชัด โดยปริมาณก๊าซสะสมภายหลังการหมัก 30 วัน มีค่าเท่ากับ 1.20 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้ง หรือ 0.19 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก ซึ่งมากกว่ากรณีการใช้กากที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซิสถึง 3 เท่า ซึ่งในส่วนของการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยกรดที่ให้ปริมาณ

น้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยสูงที่สุดนั้น กลับให้ก๊าซในปริมาณต่ำโดยมีค่าต่ำกว่าของกรณีการใช้กากมันที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซิส

นอกจากการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว การเลือกใช้จุลินทรีย์ในการหมักก็มีความสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพเช่นเดียวกัน [6] จากงานวิจัยของ พงษ์พันธุ์ พรหมพิทักษ์ และ ธนากร วงวัฒนาเสถียร [7] ได้ทำการศึกษารหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง โดยศึกษาและทดสอบหาหัวเชื้อจุลินทรีย์จากฟาร์มสุกร, ฟาร์มวัว และโรงงานแป้งมันสำปะหลังและปรับค่า pH 7 (เป็นกลาง) ที่อุณหภูมิ 35 °C และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ จากกากมันสำปะหลังหลังกระบวนการผลิตแป้งมัน และศึกษาผลของอุณหภูมิและสภาพความเป็นกรด - ด่าง ที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ จากการศึกษาพบว่า การใช้กากมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ควรใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง และควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C ค่า pH 8 เพื่อให้เกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยศึกษาผลของ pH อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหย ที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังในรูปของของแข็งทั้งหมด 1.67%TS และ 5%TS เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ลักษณะกากมันสำปะหลัง

ลักษณะกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการศึกษา
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	22,000
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	35,400
กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids, VFA)	มิลลิกรัมอะซิติคต่อลิตร	161.67
อัลคาไลน์ตี	มิลลิกรัมต่อลิตร	336.67
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus, TP)	มิลลิกรัมต่อลิตร	10.86
ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)	มิลลิกรัมต่อลิตร	93.52
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	%	84.05
ของแข็งระเหย (Total Volatile Solids, TVS)	%	82.16

*หมายเหตุทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

2.2 ลักษณะเชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักย่อยกากมันสำปะหลังเตรียมโดยใช้ตะกอนจากถังหมักกรดของระบบ Covered Lagoon มีลักษณะตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการศึกษา
pH	-	4.13
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	18,666
กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids, VFA)	มิลลิกรัมอะซิดต่อลิตร	140
อัลคาไลน์ตี (Alkalinity)	มิลลิกรัมต่อลิตร	716
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	40,465
ของแข็งระเหย (Total Volatile Solids, TVS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	38,336

2.3 การหาปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง

การศึกษาค่าของ pH อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ต่อการเกิดไฮโดรไลซิส เริ่มจากการหาความเข้มข้นของสารละลายกรดหรือด่างตามต้องการ โดยการเติมสารละลายกรดหรือด่างที่มีความเข้มข้นหนึ่งเรื่อยๆ จนได้ค่า pH ที่ต้องการ ลงในกากมันสำปะหลัง 43.75 กรัม จดปริมาตรสารละลายที่เติมจากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นที่ต้องการเพื่อให้ได้อัตราส่วนการเติมสารละลายกรดหรือด่างต่อกากมันสำปะหลังเท่ากับ 8 : 1 โดยปริมาตรสารละลายต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง มีความเข้มข้นเป็น 1.67%TS และจากนั้นเริ่มการทดลองโดยใช้กากมันสำปะหลัง 100 กรัม มาผสมกับน้ำหมักกรดจากระบบ UASB 250 มิลลิเมตร ได้สารละลายกากมัน 500 มิลลิเมตร ซึ่งมีความเข้มข้นเป็น 5%TS หลังจากนั้นนำสารละลายดังกล่าวให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่สนใจศึกษา เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา ปรับ pH เป็นกลางทั้งนี้ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายผสมเปลี่ยนแปลง $\pm 10\%$ และนำไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที ใช้เวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการแยกระหว่างตะกอนและสารละลายใสเพื่อนำไปตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธีเฮนดอส (Dinitrosalicylic Colorimetric Method) และกรดไขมันระเหย [8]

2.4 ศึกษาผลของการเกิดก๊าซชีวภาพเนื่องจากน้ำตาสดรีวิวจและกรดไขมันระเหย

เริ่มจากการนำสารละลายกากมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยช่วง pH ที่กำหนด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเลือกสภาวะหลังจากทำขั้นตอนการหาปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังเสร็จสิ้น เตรียมสารอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีอัตราส่วน COD : N : P เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 แล้วปรับ pH ให้เป็นกลาง ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนของแข็งระเหย 0.5 : 1 ทำการบรรจุสารละลายในขวดหมักใส่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนนาน 3 นาทีก่อนปิดขวดให้สนิท ทำการหมักเป็นเวลา 30 วัน เมื่อทำการหมักครบตามเวลาที่กำหนดให้ทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย และนำไปตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ โดยการทดลองดำเนินการในอาคารศูนย์เครื่องมือ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

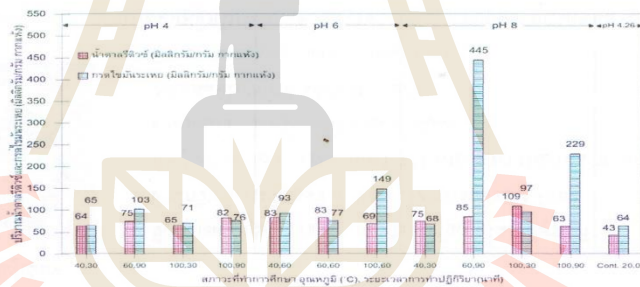
3. การทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ศึกษาผลของ pH อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

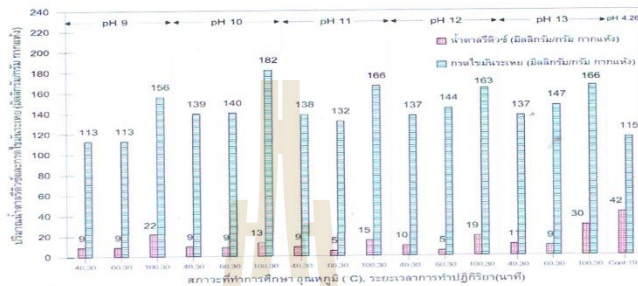
ศึกษาผลของ pH, อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมัน

3.1.1 สภาวะที่เป็นค่า

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่ได้จากการศึกษา pH อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ในช่วง pH 8 – pH 13 แสดงได้ดังรูปที่ 1 - 2 ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารด่างที่สภาวะต่างๆ อยู่ในช่วง 5.10 – 109.25 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง ซึ่งสภาวะค่าที่ให้ค่าน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดคือ pH 8, อุณหภูมิ 100 °C, และทำปฏิกิริยา 30 นาที มีค่าสูงที่สุด 109.25 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง เมื่อเทียบกับชุดควบคุม สภาวะดังกล่าวให้น้ำตาลรีดิวซ์ได้มากกว่าถึง 2.5 เท่า สำหรับกรดไขมันระเหยพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 68.17 – 444.67 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง ซึ่งช่วงที่ให้ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดคือ pH 8, อุณหภูมิ 60 °C, และทำปฏิกิริยา 90 นาที มีค่าสูงที่สุดจากระดับเริ่มต้นประมาณ 5 เท่า เมื่อทำการวิเคราะห์หาผลของปัจจัยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P < 0.05) ค่า pH และอุณหภูมิของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายกากมันสำปะหลังเป็นน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด ส่วนปัจจัยที่มีผลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญของการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันระเหยคือ pH กับอุณหภูมิ, อุณหภูมิกับเวลา และปัจจัยทั้งสามยังมีผลร่วมกันอีกด้วย



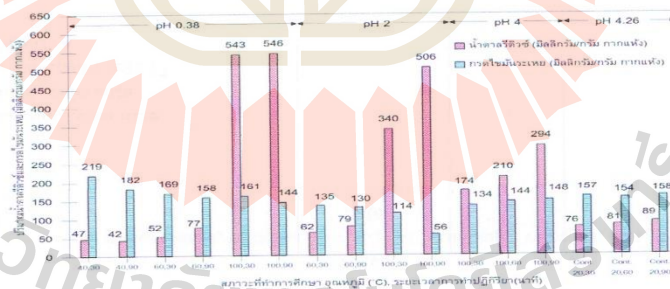
รูปที่ 1 การเกิดน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่สภาวะค่า อุณหภูมิ(°C), ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา(นาที) ที่ความเข้มข้น 1.67%TS



รูปที่ 2 การเกิดน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่สภาวะต่างอุณหภูมิ (C), และเวลาการทำปฏิกิริยา (นาที) ที่ความเข้มข้น 5%TS

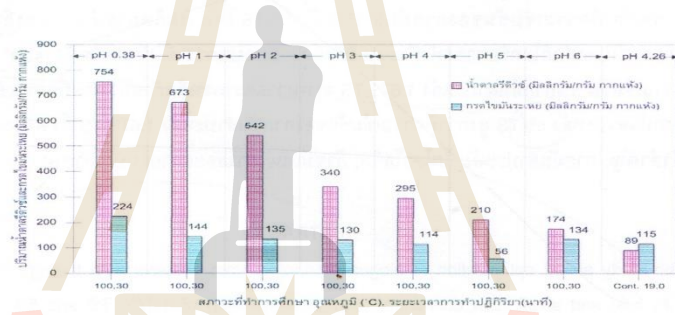
3.1.2 สภาวะที่เป็นกรด

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่ได้จากการศึกษา pH อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ในช่วง pH 0.38 – pH 7 แสดงได้ดังรูปที่ 3 - 4 จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซิสจากมันสำปะหลังด้วยกรดที่สภาวะต่างๆ อยู่ในช่วง 42.46 – 754.66 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง ซึ่งช่วงที่ให้ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดคือ pH 0.38, 100 °C, 30 นาที มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดจากระดับเริ่มต้นถึง 8 เท่า เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่สภาวะกรดมาวิเคราะห์หาผลของปัจจัยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P < 0.05) จะพบว่าค่า pH และอุณหภูมิของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายกากมันสำปะหลังน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด อนึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับการทดลองของ Agu R.C [9] ซึ่งทำการศึกษากการไฮโดรไลซิสมันสำปะหลังเส้นด้วยกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 120 °C และอัตราส่วนกรัมของมันสำปะหลังต่อมิลลิลิตรของสารละลายกรด เท่ากับ 1 : 10 โดยทำการแปรผันความเข้มข้นของสารละลายกรดและระยะเวลาทำปฏิกิริยา ที่พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิสคือ pH โดยเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรด ซึ่งก็คือ การลดค่า pH ลง จะทำให้มีน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3 การเกิดน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่สภาวะกรดอุณหภูมิ (C), และเวลาการทำปฏิกิริยา (นาที) ที่ความเข้มข้น 1.67%TS

ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่า สภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุด คือ pH 0.38, 100 °C, 30 นาที แต่เนื่องจากสภาพของกากมันสำปะหลังเมื่อทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูงและมีสภาพความเป็นกรดสูง จะทำให้กากมันสำปะหลังเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงจนกลายเป็นสีดำใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Agui R.C [9] ที่ศึกษาการไฮโดรไลซิสเปลือกและกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.20 – 5.00 โมลาร์ ปรากฏว่า เมื่อทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรดแต่ละความเข้มข้นแล้ว กรดที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 1.00 โมลาร์ขึ้นไปทำให้สารละลายกากมันสำปะหลังเริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำ และสอดคล้องกับการศึกษาของ อุดมเกียรติ พรธนประเทศ [10] ที่ศึกษาการไฮโดรไลซิสแป้งเป็น 4 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด และแป้งด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.70 - 1.00 สำหรับแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว และความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.20 - 0.50 สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ที่ความเข้มข้นกรดร้อยละ 0.20 ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเปลี่ยนเป็นสีแดงจาง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นสีจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ผลผลิตกรดไขมันระเหยที่ได้มีค่าต่ำกว่าน้ำตาลรีดิวซ์มาก แสดงว่า ผลผลิตหลักที่ได้จากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรด คือ น้ำตาลรีดิวซ์

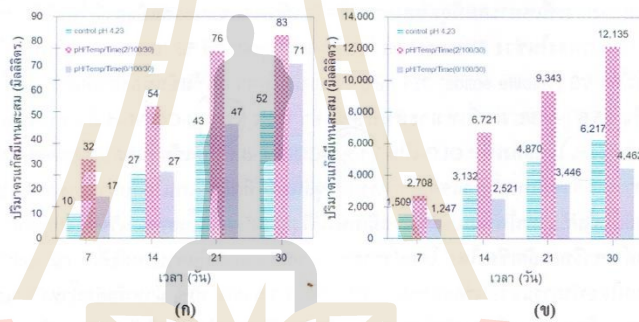


รูปที่ 4 การเกิดน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่สภาวะกรด อุณหภูมิ (°C), ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา (นาที) ที่ความเข้มข้น 5%TS

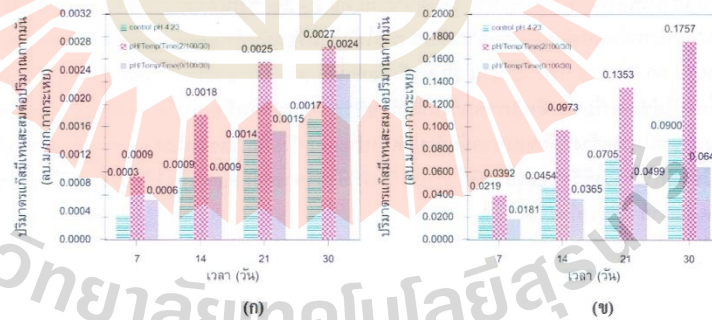
อย่างไรก็ตาม ยังมีอีก 2 สภาวะที่มีความสำคัญไม่ต่างจากสภาวะแรก เนื่องจาก ใช้ปริมาณกรดน้อยกว่า แต่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่าย ที่อาจจะสามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ดี คือ ที่ pH 2 อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงเหมือนกันคือ 339.15 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง อีกทั้งให้กรดไขมันระเหย 113.89 มิลลิกรัมอะซิติกต่อกรัมกากแห้ง และที่ pH 4 อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงเหมือนกันคือ 174.04 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง อีกทั้งให้กรดไขมันระเหย 133.70 มิลลิกรัมอะซิติกต่อกรัมกากแห้ง

3.2 ผลของการเกิดก๊าซชีวภาพเนื่องจากน้ำตาลรีดิซและกรดไขมันระเหย
3.2.2 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

อัตราเร็วและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงไว้ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าอัตราเร็วและประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับสภาวะที่มีการย่อยสลายกากมันด้วยสารกรดที่ pH 0.38 สูงกว่าสภาวะควบคุม 1 เท่า และ pH 2 สูงกว่าสภาวะควบคุม 2 เท่า เนื่องจากย่อยสลายกากมันสำปะหลังก่อนการหมัก มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 1.67%TS จะพบว่า pH 2 ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งในแง่ของอัตราเร็วและความสามารถในการสร้างก๊าซอย่างโดดเด่น ในขณะที่สภาวะที่ pH 0.38 ให้อัตราเร็วและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซใกล้เคียงกัน และสูงกว่าของสภาวะควบคุมไม่มากนัก โดยให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมภายหลังการหมัก 30 วันเท่ากับ 0.0027 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมการระเหย เช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 5%TS จะพบว่า pH 2 เป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมภายหลังการหมัก 30 วันเท่ากับ 0.1757 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมการระเหย ซึ่งสูงกว่าที่สภาวะควบคุม 2 เท่า



รูปที่ 5 ปริมาณก๊าซมีเทนที่สะสมในระบบ (ก) 1.67%TS (ข) 5%TS



รูปที่ 6 ปริมาณก๊าซมีเทนที่สะสมในระบบต่อปริมาณกากมันสำปะหลังที่ระเหยได้ (ก) 1.67%TS (ข) 5%TS

ผลจากการศึกษาอัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังในรูปของของแข็งทั้งหมด ทั้งที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 1.67%TS และ 5%TS พบว่า สภาวะที่เหมาะสมและให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมภายหลังการหมัก 30 วัน สูงที่สุดคือ สภาวะ pH 2, อุณหภูมิ 100 °C, และทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5%TS ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมากกว่าที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 1.67%TS สูงถึง 65 เท่า ซึ่งผลการศึกษาที่สอดคล้องกับการศึกษาของ กิตติกันท์ สุวาณิชย์ [5] อีกทั้งที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 5%TS ยังมีความเหมาะสมต่อการเดินระบบจริงมากกว่าที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 1.67%TS ดังผลการศึกษาของ พิทยา สวีสสม [3]

3.3 การประเมินค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง

การประเมินค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง ต่อความสามารถในการทดแทนค่าใช้จ่ายในรูปของก๊าซหุงต้มและพลังงานไฟฟ้า ที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 1.67%TS และ 5%TS แสดงได้ดังตารางที่ 3

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ได้ 0.46 กิโลกรัม [11] ราคาแก๊สหุงต้ม (LPG) กิโลกรัมละ 18.30 บาท [12] สำหรับการใช้ก๊าซชีวภาพเพื่อทดแทนพลังงานไฟฟ้า ก๊าซชีวภาพ 1.00 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้า ได้ 1.20 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง [11] ราคาไฟฟ้าที่คิดจากค่าเฉลี่ยหน่วยของพลังงานไฟฟ้า 2.2695 บาทต่อหน่วย (หน่วยไฟฟ้าคือ กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง) [14] ผลจากการศึกษาพบว่า ที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 1.67%TS และ 5%TS สภาวะที่ pH 2 อุณหภูมิ 100 °C, และทำปฏิกิริยา 30 นาที เป็นสภาวะที่ทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพในรูปของก๊าซมีเทนสูงที่สุด โดยที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5%TS สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับแก๊สหุงต้มและพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 1.67%TS ถึง 65 เท่า เนื่องจากความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังที่มากขึ้นมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ กิตติกันท์ สุวาณิชย์ [5] และ กิตติยาพร สมบูรณ์ [13] กล่าวคือ มีค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิสที่สภาวะควบคุมและสภาวะกรดสูงกว่าความสามารถในการทดแทนค่าใช้จ่ายในแก๊สหุงต้ม และพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 3 ค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังและความสามารถในการทดแทนค่าใช้จ่ายในรูปของแก๊สหุงต้มและพลังงานไฟฟ้า

ความเข้มข้น กากมัน สำปะหลัง	pH	Temp (°C)	Time (min)	ค่าสารเคมี (บาท/กก. กากแห้ง)	ก๊าซ CH ₄ (ม ³ /กก. กากแห้ง)	ทดแทนแก๊สหุงต้ม (LPG)		ทดแทนพลังงานไฟฟ้า	
						(กก.LPG/ กก.กาก แห้ง)	ทดแทน ค่าใช้จ่าย (บาท/ กก.กากแห้ง)	(kW/h)	ทดแทน ค่าใช้จ่าย (บาท/วัน)
1.67%TS	0.38	100	30	374.14	0.0024	0.0011	0.0202	0.0029	0.0066
	2	100	30	39	0.0027	0.0012	0.0227	0.0033	0.0074
	Cont.	19.8	-	12.44	0.0017	0.0008	0.0143	0.002	0.0046
5%TS	0.38	100	30	374.14	0.0646	0.0297	0.5438	0.0778	0.1766
	2	100	30	39	0.1757	0.0808	1.479	0.2117	0.4804
	Cont.	19.8	-	12.44	0.09	0.0414	0.7576	0.1084	0.2461

4. สรุปผลการศึกษา

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมรรถนะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรดและสารค่างเป็นน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหย ได้แก่ pH และอุณหภูมิ โดย pH ของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลมากที่สุด ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 1.67%TS pH 0.38, อุณหภูมิ 100 °C และทำปฏิกิริยา 90 นาที สามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงถึง 545.63 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง อีกทั้งให้ปริมาณกรดไขมันระเหยมากถึง 143.60 มิลลิกรัมอะซิดิกต่อกรัมกากแห้ง มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5%TS สภาวะ pH 2 , 100 °C, 30 นาที ที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 542.88 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง และปริมาณกรดไขมันระเหย 135.74 มิลลิกรัมอะซิดิกต่อกรัมกากแห้ง โดยสภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุดที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5%TS คือ การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังที่ pH 0.38, อุณหภูมิ 100 °C และทำปฏิกิริยา 30 นาที ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงถึง 754.66 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเดียวกัน ในสภาวะ pH 2, อุณหภูมิ 100 °C และทำปฏิกิริยา 30 นาที จะพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่แตกต่างกันมากนัก

อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมภายหลังการหมัก 30 วัน ที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 1.67%TS pH 2, อุณหภูมิ 100 °C, และทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนนำไปหมักก๊าซ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุด 0.0027 ลูกบาศก์เมตรต่อลิตรกรัมกากแห้งระเหย หรือ 0.0014 ลูกบาศก์เมตรต่อลิตรกรัมกากเปียก และที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 5%TS pH 2, อุณหภูมิ 100 °C, และทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนนำไปหมักก๊าซ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุดเท่ากับ 0.1757 ลูกบาศก์เมตรต่อลิตรกรัมกากแห้งระเหย หรือ 0.1233 ลูกบาศก์เมตรต่อลิตรกรัมกากเปียก ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายได้มากกว่าความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 1.67%TS ถึง 65 เท่า ในส่วนของการผลิตก๊าซชีวภาพภายหลังไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสภาวะ pH 0.38 , อุณหภูมิ 100 °C และทำปฏิกิริยา 30 นาที ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากกว่าที่สภาวะ pH 2, อุณหภูมิ 100 °C และทำปฏิกิริยา 30 นาที แต่กลับให้ความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำกว่า เนื่องจากความเข้มข้นกรดสูงทำให้จุลินทรีย์ในระบบทำงานได้ไม่ดีพอ จึงทำให้เกิดก๊าซชีวภาพในระบบต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก “ทุนโครงการการให้ทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุนOROG)” ปีการศึกษา 3/2557 สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.นิตยา บุญเทียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนและให้คำปรึกษาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sriroth, K., Rojanaridpiched, C., Vichukit, V., Suriyaphan, P., Oates, C.G. (2000). "Present situation and future potential of cassava in Thailand". Paper presented at The 6th regional cassava workshop. 11 - 26 Feb., Ho Chi Minh city, Vietnam.
- [2] Kaparaju et al. (2010). "Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor". Technical University of Denmark. Building
- [3] Pitchayae et al. (2007). "Biogas production capacity from cassava pulp and heat production enhancement or enzyme". Energy Research and Development Institute – Nakomping, Chiang Mai University.

- [4] Antonopoulou, G., Alexandropoulou, M., and Lyberatos, G. (2010). "The effect of thermal, chemical and enzymatic pretreatment on saccharification and methane generation from sunflower straws", Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste, 8 – 11 November 2010, Cini Foundation, Venice, Italy.
- [5] Kittikarn Sukwanitch. (2011). "Comparison of Biogas Production Improvement from Cassava Pulp between Acid and Alkaline Hydrolysis Processes". Master of Science Thesis in Environmental Engineering, Graduate School, Chiang Mai University.
- [6] Taconi et al. (2007). Feasibility of methanogenic digestion applied to a low pH acetic acid solution. Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alabama in Huntsville, 130 Engineering Building, Huntsville, AL 35899, United States.
- [7] Phongphan Promphiphak. (2012). "Biogas Production by using Cassava Waste Cake from The Production of Cassava Starch". Master of Science Thesis in Mechanical Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.
- [8] Miller, G. L. (1959). "Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugars". Analytical Chemistry 31: 426-428.
- [9] Agu,R.C., Amadife,A.E., Ude,C.M., Onyia,A., Ogu,E.O., Okafor,M. and Ezejiolor, E. (1997). "Combined heat treatment and acid hydrolysis of cassava grate waste (CGW) biomass for ethanol production". Waste Management Vol.17: 91-96.
- [10] Udomkiat Punthanapradet. (1993). "Effect of acid and enzymatic hydrolyses on composition of starch syrups from 4 types of flour". Master of Science Thesis in Food Science & Technology, Kasetsart University
- [11] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2005). "Development of training courses and public relations on biogas." [Online], www2.dede.go.th/km_ber/elearn/lesson4.pdf, (March 10, 2016).
- [12] PTT Public Company Limited. (2016). "Oil Price". [Online], <http://gasprice.kapook.com/gasprice.php> (March 10, 2016).
- [13] Kitiyaporn Somboon. (2011). "Improvement of Biogas Production Efficiency from Cassava Pulp by Mixed Enzymes of Cellulase and Pectinase" Master of Science Thesis in Environmental Engineering, Graduate School, Chiang Mai University.
- [14] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2011). "Metropolitan Electricity Authority Rates". [Online], <http://www2.eppo.go.th/power/pw-Rate-MEA.html>, (March 10, 2016)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ A²/O โดยนำน้ำทิ้ง กลับมาบำบัดอีกครั้ง

Increasing Efficiency of A²/O Processes by Recycle Effluent Water

ฉัตรลดา เทียชัย¹ นิตยา บุญเทียน^{2*} อุษา ยิ่งชล¹ และ Htay Aung Pyae¹
 Chatlada Piasai¹ Nittaya Boontian^{2*} Usa Yingchon¹ and Htay Aung Pyae¹
¹นักศึกษาสหวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต; ²อาจารย์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000
 โทรศัพท์ : 044-224584, โทรสาร : 044-224606, E-mail : n.boontian@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบกระบวนการ A²/O โดยการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบ ที่ประกอบด้วยถังแอนแอโรบิก ถังแอนอกซิก และถังแอโรบิก ซึ่งใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซีโอดี 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และในโตรเจนในรูปของทีเคเอ็น 700 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบปกติและระบบที่มีการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบเมื่อมีการเดินระบบปกติ และช่วงที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบเมื่อมีการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง ซึ่งผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ A²/O ปกติและระบบที่มีการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัด 30 เปอร์เซ็นต์ สามารถบำบัดซีโอดีได้ 83.33 และมากกว่า 99.99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมีความเข้มข้นของซีโอดีเท่ากับ 885 และประมาณ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจเนื่องมาจากการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง ส่งผลให้ไปเพิ่มค่า HRT ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการบำบัด ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มสูงขึ้น ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดในโตรเจนในรูปของทีเคเอ็นและแอมโมเนียมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันคือ มากกว่า 99.99 เปอร์เซ็นต์ทั้งสองช่วง ดังนั้น ช่วงที่มีน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้งจึงมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกำจัดในโตรเจนในรูปของทีเคเอ็น และแอมโมเนีย

คำสำคัญ : A²/O; แอมโมเนีย; HRT; ซีโอดี; ยูโทรฟิเคชัน; ทีเคเอ็น



Abstract

This research aimed to study the increase efficiency of A²/O processes by recycle effluent water. The A²/O process consists of anaerobic, anoxic and aerobic units in succession. The wastewater containing SCOD of 5,000 milligrams per liter and nitrogen (TKN form) about 700 milligrams per liter was studied. This results were compared between conventional A²/O and added into recycle effluent water. Examination has conducted into two phases: first to study the efficiency of the conventional A²/O system and the second to study the efficiency of the system in recycle effluent water. The Experimental results demonstrated that the treatment efficiencies of conventional A²/O system and system with recycle effluent water was 30%. Overall efficiency were 83.33 and 99.99 percent respectively. It has SCOD concentration as 885 and approximately 0 milligram per liter. Because of return waste water treatment to increase the HRT resulted in an increased duration of treatment. Thus increasing the efficiency of the system. After gaining efficiency for two periods, nitrogen removal was found more than 99.99 percent. Thus the removal of nitrogen in the form of TKN and ammonia also had huge effect to recycle treatment.

Keywords : A²/O; Ammonia; HRT; SCOD; Eutrophication; TKN

บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการเจริญเติบโตในภาคอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากการพัฒนาของเศรษฐกิจ และสังคม ซึ่งมีการใช้ทรัพยากรเพิ่มมากขึ้น เกิดของเสียจากกระบวนการผลิตสูงขึ้น ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของประชาชน ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นสูง เช่น มีปริมาณของซีโอดี และไนโตรเจนสูง ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญ ที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน [1] จึงมีความจำเป็นต้องบำบัดก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หากน้ำเสียมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงมาก การบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำไม่สามารถบำบัดให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ จนก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมา [2]

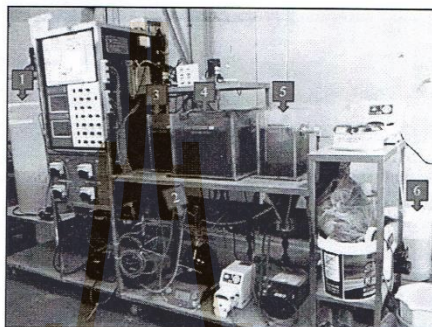
กระบวนการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ เช่น ระบบ A²/O ระบบ Bardenpho University of cape town ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ถูกพัฒนาและใช้อย่างกว้างขวาง [3, 4] กระบวนการ A²/O ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้มากที่สุดในระบบบำบัดน้ำเสีย [5] กระบวนการ A²/O เป็นกระบวนการที่ดัดแปลงมาจากกระบวนการ A/O โดยเพิ่มถังแอนอ็อกซิกสำหรับการกำจัดไนโตรเจน เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ประกอบด้วยสามถังปฏิกิริยา คือถังแอนแอโรบิก ถังแอนอ็อกซิก และถังแอโรบิก ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ [6] และ 95.87 เปอร์เซ็นต์ [7] แต่พบว่าเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงมาก ระบบนี้จะไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ จึงได้มีการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว กลับเข้าสู่ระบบอีกครั้ง โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบ A²/O โดยการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดเข้าสู่ระบบอีกครั้ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด ด้วยกระบวนการ A²/O เมื่อมีการนำน้ำที่เข้าสู่ระบบอีกครั้ง ดังรูปที่ 1 โดยอธิบายได้ว่า จุดที่ 1 ถังน้ำเข้า, จุดที่ 2 ถังแอนแอโรบิก (Anaerobic), จุดที่ 3 ถังแอนอ็อกซิก (Anoxic), จุดที่ 4 ถังแอโรบิก (Aerobic), จุดที่ 5 ถังตกตะกอน, จุดที่ 6 ถังน้ำทิ้ง แต่เนื่องจากผลการทดลองของค่าพารามิเตอร์ในน้ำทิ้งยังไม่



ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน จึงทำการศึกษาการ น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัด เข้าสู่ระบบอีกครั้ง โดยทำการนำน้ำทิ้งกลับมาใน ถังแอนออกซิก 30 เปอร์เซนต์ของน้ำทิ้งในแต่ละวัน ซึ่งเหมือนเป็นการเพิ่มค่า HRT ด้วย เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่ออกมาผ่านตาม เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม



รูปที่ 1 แสดงภาพรวมทั้งหมดของระบบ A/O

วิธีดำเนินการศึกษาประกอบด้วย

1. การนำจุลินทรีย์จากโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพศูนย์อนามัยที่ 5 ตำบลโคกกรวด จังหวัดนครราชสีมา มาเติมใน ถังเติมอากาศเพื่อเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ
2. สารเคมีในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการสังเคราะห์น้ำเสียซีไอดี เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) และมีค่าที่เคเอ็น เท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดอายุสลัดจ์ (SRT) เท่ากับ 20 วัน กำหนดค่า HRT ในถังเติมอากาศเท่ากับ 8 ชั่วโมง ปริมาตรถัง 20 ลิตร กำหนดค่า HRT ในถังแอนแอโรบิกและถังแอโรบิกเท่ากับ 2 ชั่วโมง ปริมาตรถัง 5 ลิตร ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่า HRT และปริมาตรในแต่ละถัง

ถังปฏิกริยา	HRT(ชั่วโมง)	ปริมาตรถัง(ลิตร)	SRT(วัน)	F/M
แอนแอโรบิก	2	5	20	0.52
แอนออกซิก	2	5		0.52
แอโรบิก	8	20		0.53

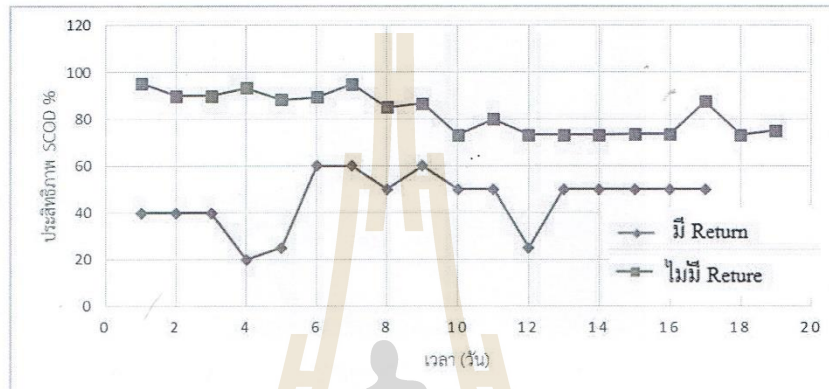
3. การทดลองดำเนินการ 2 ช่วง คือวันที่ 26 กรกฎาคม 2558 จนถึงวันที่ 17 กันยายน 2558 ทำการเดินระบบ A/O แบบปกติ และวันที่ 18 กันยายน 2558 จนถึงวันที่ 7 ตุลาคม 2558 ทำการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดใหม่อีกรอบ โดยนำเข้าสู่ ถังแอนออกซิก 30 เปอร์เซนต์

4. วิเคราะห์พารามิเตอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบทั้งสองกรณี โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามวิธีของ APHA, 2005



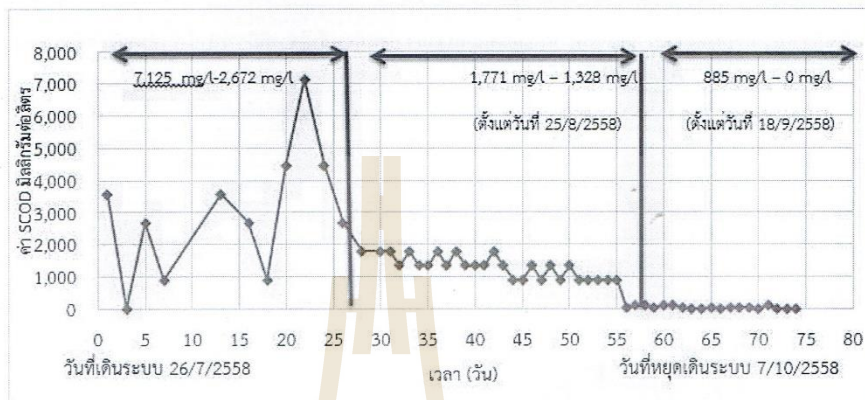
ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองประกอบด้วย ค่าการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของน้ำเสียและน้ำทิ้งจากระบบที่มีการเดินระบบปกติ และจากระบบที่มีการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง รวมถึงประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ



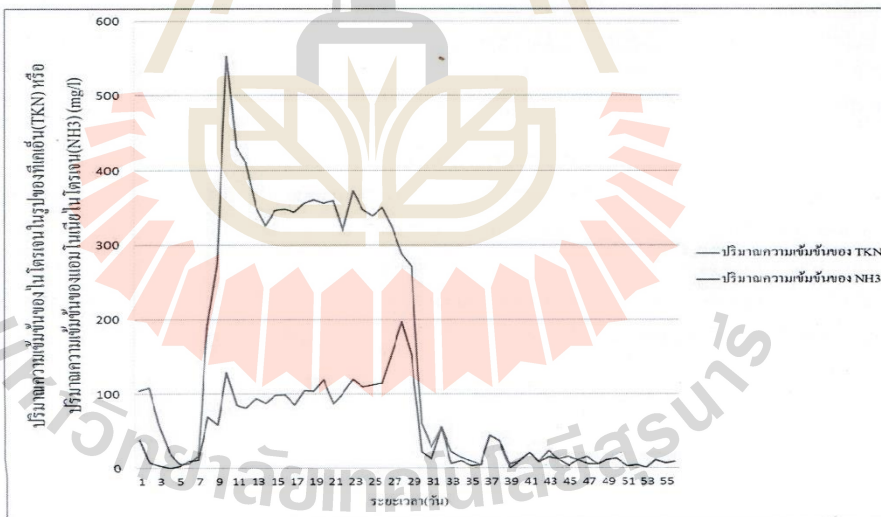
รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด SCOD (%) ของระบบทั้งหมดกับเวลา (วัน)

จากกราฟที่ 1 จะแสดงให้เห็นว่าแสดงให้เห็นว่าค่า COD น้ำเข้าสู่ระบบประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองการศึกษากำจัด SCOD ในน้ำออกก่อนการนำน้ำทิ้งมาบำบัดอีกครั้ง มีค่า SCOD ประมาณ 885 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการบำบัด SCOD ประมาณ 83.33 เปอร์เซ็นต์ หลังการศึกษานำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง สามารถกำจัด SCOD ในน้ำออกเหลืออยู่ประมาณ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการบำบัด SCOD มากกว่า 99.99 เปอร์เซ็นต์ พบว่าหากค่า HRT ที่อยู่ในดังมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น และน้ำทิ้งที่นำมาบำบัดอีกครั้ง จะเกิดการเจือจาง จึงทำให้ค่า SCOD ในน้ำเจือจางลง และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำก็มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบซึ่งค่า F/M ในระบบประมาณ 0.5 มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SCOD ในน้ำทิ้ง (mg/l) กับเวลา (วัน)

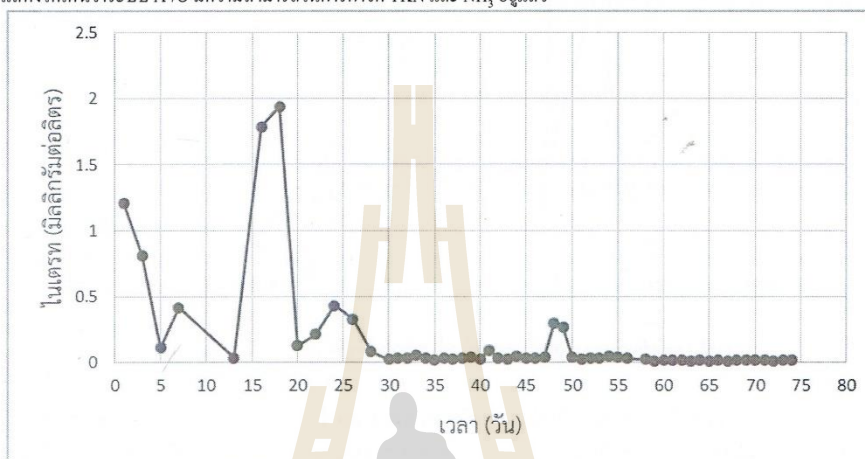
จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ค่า COD ในน้ำเข้าผู้ระบบประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองการศึกษากำจัด SCOD ในน้ำออกก่อนการนำน้ำทิ้งมาบำบัดอีกครั้ง มีค่า SCOD ประมาณ 1,328 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังการศึกษากำจัดน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง พบว่าการกำจัด SCOD ในน้ำออกสลด มีค่า SCOD ประมาณ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร การนำน้ำทิ้งที่นำมาบำบัดอีกครั้งจะเกิดการเจือจาง ค่า HRT ที่อยู่ในถังมากขึ้น เวลาการบำบัดนานขึ้น จะทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นลดลง



รูปที่ 4 กราฟแสดงปริมาณความเข้มข้นของ TKN และ NH₃ (mg/l) ที่เวลาต่างๆ



จากรูปที่ 4 พบว่าค่า TKN และค่า NH_3 ที่อยู่ในช่วงปกติ เริ่มต้นของระบบค่ายังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อผ่านไประยะหนึ่ง พบว่าค่าของทั้ง TKN และ NH_3 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานฯ ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงที่มีการนำน้ำทิ้งที่บำบัดอีกครั้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบ A²O มีความสามารถในการกำจัด TKN และ NH_3 อยู่แล้ว



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไนเตรทของน้ำที่ผ่านการบำบัด (mg/l) กับเวลา (วัน)

จากรูปที่ 5 พบว่าค่า SCOD น้ำเข้าสู่ระบบประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า F/M ประมาณ 0.5 ถึงแอนอกซิกที่ ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนจากไนเตรทเป็นไนโตรเจนก๊าซ จากผลการทดลอง- มีค่าไนเตรทประมาณ 0.02 (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำทิ้ง ซึ่งมาตรฐานกำหนดค่าไนเตรทในน้ำทิ้งประมาณ 0.03 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สรุป

การศึกษาระบบบำบัด A²O ในการบำบัดค่าซีโอดี และไนโตรเจนที่สูง มีค่าซีโอดีที่สังเคราะห์ในน้ำเข้าสู่ระบบ ประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ TKN 700 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดก่อนมีการย้อนกลับ จะอยู่ที่ประมาณ 83.88 เปอร์เซ็นต์ และค่า SCOD ในน้ำออกประมาณ 885 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกินมาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดอยู่ที่ประมาณ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากมีการนำน้ำทิ้งกลับมาในถังแอนอกซิก ค่า SCOD ในน้ำทิ้งเท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่า 99.99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนค่าที่เคเอ็นและแอมโมเนีย พบว่าการรีเทิร์นน้ำออกเข้าสู่ระบบมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกำจัด และค่าไนโตรเจนผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนดส่วนไนเตรด ไม่ผ่านตามเกณฑ์ฯ



ตารางที่ 2 ตารางแสดงสรุปค่าประสิทธิภาพ (%) และปริมาณความเข้มข้น (mg/l) ที่เหลืออยู่ในน้ำออกจากระบบ

พารามิเตอร์	ไม่มีการย้อนกลับของน้ำทิ้ง		มีการย้อนกลับของน้ำทิ้ง	
	ประสิทธิภาพ(%)	ความเข้มข้น(mg/l)	ประสิทธิภาพ(%)	ความเข้มข้น(mg/l)
SCOD	83.88	885	>99.99	0
TKN	99.99	3	99.99	1-2
NH ₄	99.99	1-2	>99.99	0
NO ₂ ⁻	-	0.3	-	0.1
NO ₃ ⁻	-	0.02	-	0.1
TS	-	400	-	200
TDS	-	60	-	110
TSS	-	351	-	120

ผลการทดลองจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การกำจัด SCOD ในน้ำออกก่อนนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง มีค่า SCOD ประมาณ 885 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการบำบัด SCOD ประมาณ 83.33 เปอร์เซ็นต์ หลังการศึกษามีการย้อนกลับ น้ำทิ้งกลับมาบำบัดใหม่การกำจัด SCOD ในน้ำออกมีค่า SCOD ประมาณ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการบำบัด SCOD มากกว่า 99.99 เปอร์เซ็นต์ พบว่าหาก HRT ที่อยู่ในถังมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น และน้ำทิ้งที่ทำการบำบัดใหม่ จะเกิดการเจือจาง จึงทำให้ค่า SCOD ในน้ำเจือจางลง และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น ในเครทในน้ำออกประมาณ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานองค์การอนามัยโลกกำหนด (ประมาณ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากผลการทดลองมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง ถึงแม้จะทำการนำน้ำกลับมาบำบัดแล้วก็ตาม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจะอยู่ที่ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากอากาศที่มาจากท่อปล่อยอากาศมีแรงดันอากาศน้อย แม้มีค่า DO อยู่ที่ 4-5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ก็ยังมีค่าเกินมาตรฐาน

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของทั้งสองช่วง

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านพลังงานช่วงที่มีการเดินระบบปกติ และช่วงที่มีการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง ที่มีค่าพลังสูงขึ้น แต่สามารถทำให้ค่าน้ำออกไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือไม่เกิดปัญหา Eutrophication มีข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าของระบบ A²O ปกติและระบบ A²O ที่มีการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง

ระบบ	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/เดือน)
A ² O	7,431.58
A ² O ที่มีการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง	9,340



จากตารางที่ 3 แสดงค่าพลังงานในช่วงการเติมอากาศแต่ละช่วงนั้น อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่เข้าระบบมีการไหลเข้าของน้ำเสียในปริมาณที่เท่ากันทั้ง 2 ช่วงการเติมอากาศและขนาดของระบบมีขนาดเท่ากันจึงสามารถนำค่าพลังงานต่อเดือนที่คำนวณได้นี้มาทำการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานได้เลย จะเห็นว่าช่วงที่มีการเดินระบบปกติมีค่า SCOD ประมาณ 885 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อมีการนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้งเป็นผลให้ SCOD ในน้ำออกมีค่า SCOD ประมาณ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Ge, S. Wang, X. Yang. 2015. Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment, *Chemosphere* 140; 85-98.
- [2] Zubrowska-Sudol, M. and J. Walczak (2015). Enhancing combined biological nitrogen and phosphorus removal from wastewater by applying mechanically disintegrated excess sludge, *Water Research*, 76; 10-18.
- [3] G.B. Zhu., Y. Peng, S. Wang., et. al. (2007). Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process, *Chemical Engineering Journal*, 131; 319-328.
- [4] Y. Chen, C. Peng, J. Wang, et. al. (2011). Effect of nitrate recycling ratio on simultaneous biological nutrient removal in a novel anaerobic/anoxic/oxic (A2/O)-biological aerated filter (BAF) system, *Bioresource Technology*, 102; 5722-5727.
- [5] Y. Cheng, B. Li, L. Ye, et. al. (2015). The combined effects of COD/N ratio and nitrate recycling ratio on nitrogen and phosphorus removal in anaerobic/anoxic/aerobic(A2/O)-biological aerated filter (BAF) systems, *Biochemical Engineering Journal*, 93; 235-242.
- [6] Zhang, M., et al. (2016). Organic substrate transformation and sludge characteristics in the integrated anaerobic anoxic oxic-biological contact oxidation (A2/O-BCO) system treating wastewater with low carbon/nitrogen ratio. *Chemical Engineering Journal*, 283; 47-57.
- [7] Moharram, M. A., et al. "Performance appraisal of the A2/O process in domestic wastewater treatment replacing the anaerobic unit with UASB." *HBRC Journal*.



ทำเนียบวิทยากร

ชื่อบทความ	การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ A2/O โดยนำน้ำทิ้งกลับมาบำบัดอีกครั้ง
ผู้นำเสนอบทความ	ฉัตรลดา เพ็ญชัย
สถานที่ทำงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
โทรศัพท์ที่สะดวกให้ติดต่อ	09 4514 1429
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี : วิทยาศาสตร์บัณฑิต(อนามัยสิ่งแวดล้อม) 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศไทย
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	นิสิตบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



การเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในสภาวะไร้อากาศโดยใช้เหล็กประจุศูนย์

Enhance Sludge Fermentation by Zero Valent Iron Under

Anaerobic Conditions: A Review

นิตยา บุญเทียน^{1*} อุษา ยิ่งชล² ฉัตรลดา เพียรชัย² และ Htay Aung Pyae²

Nittaya Boontian^{1*} Usa Yingchon² Chatlada Piasai² and Htay Aung Pyae²

¹อาจารย์; ²นิสิตบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

*โทรศัพท์ : 044-224584, โทรสาร : 044-224606, E-mail : n.boontian@sut.ac.th

บทคัดย่อ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพื้นที่ในการปลูกมันสำปะหลังเป็นลำดับที่ 3 ของโลก ทำให้ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก และทำรายได้เข้าประเทศในปี 2558 ถึง 6.3 หมื่นล้านบาท แต่ในทางกลับกันอุตสาหกรรมดังกล่าวก็ก่อให้เกิดปัญหาด้านน้ำเสีย และยังมีกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเสียที่เหลือจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีปริมาณแป้งสูง สามารถนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ กากมันสำปะหลังจึงได้รับความสนใจจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังมากขึ้น แต่เนื่องจากกากมันสำปะหลังนั้นมีโครงสร้างที่ซับซ้อน การเปลี่ยนกากมันสำปะหลังไปเป็นก๊าซชีวภาพจึงเกิดขึ้นได้ยาก จากการศึกษาพบว่า หากมีการปรับสภาพกากมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสและการให้ความร้อนจะทำให้พันธะที่ซับซ้อนของกากมันสำปะหลังกลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่าย เมื่อนำกากมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ในสภาพตะกอนที่มีความเป็นกรดหรือด่างมากเกินไปยังจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน ทำให้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณน้อยและไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน จากการศึกษาในครั้งพบว่า หากมีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์เข้าไปในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากกากมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยสารกรดหรือสารด่างพร้อมทั้งมีการให้ความร้อนนั้น ถูกเร่งให้เป็นก๊าซมีเทนได้เร็วขึ้น ซึ่งการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์เข้าไปในระบบอาจเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม สำหรับการเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้

คำสำคัญ : กากมันสำปะหลัง; ไฮโดรไลซิส; เหล็กประจุศูนย์; ก๊าซมีเทน; ก๊าซชีวภาพ



Abstract

Thailand stands at the world's third largest cassava grower cassava and first highest cassava products exporter. From cassava industry alone, Thailand generates 6.3 billion Baht income for the year 2558. However, the industry also contributes both solid waste and waste water problems from its production lines. Both cassava wastewater and pulp is left over from processing in a huge amount. The pulp has a high starch content, can be used to produce biogas. Cassava has been gaining more attention for potential biomass as renewable energy source from tapioca starch industry. But, as application of cassava as major substrate for biogas production is still not significant. Although cassava pulp has slow biodegradability, the study found that biogas conversion process can be enhanced when they are subjected to pretreatment. through hydrolysis and heat, better bonding occurs enhancing the pulp by reducing sugar and fatty volatile acids under anaerobic fermentation process. When the sludge is too acidic or alkaline, it inhibits microorganisms to produce methane, leading to low methane yield and not worth the investment. From the study if zero valent iron added into biogas system, the digestion rate increases by acid hydrolysis or alkaline, with the heat, accelerating methane production. The zero valent iron added to the system may be a suitable alternative to increase biogas yields.

Keywords : Cassava Decanter Cake; Hydrolysis; Zero Valent Iron; Metane gas; Biogas

บทนำ

ในปัจจุบัน น้ำมันถั่วเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงพื้นฐานของโลก และมีการเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล เนื่องจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมคาดว่าในอนาคตอันใกล้จะเกิดวิกฤตการณ์เชื้อเพลิง พลังงานทดแทนจึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อสถานการณ์ปัจจุบันเป็นอย่างมาก ซึ่งการผลิตก๊าซชีวภาพหรือก๊าซหุงต้มจากวัสดุอินทรีย์ที่เหลือใช้จากกระบวนการในอุตสาหกรรม สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อนได้ อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังนับเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย โดยสามารถทำรายได้ให้กับประเทศในระดับต้นๆ แต่ในทางกลับกัน อุตสาหกรรมดังกล่าวก็ก่อให้เกิดปัญหาด้านน้ำเสีย และยังมีกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเสียที่เหลือจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีปริมาณแป้งสูง [1] จึงคาดว่ากากมันสำปะหลังจะมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี การลดของเสียที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนกากมันสำปะหลังเป็นก๊าซชีวภาพจึงเริ่มได้รับความสนใจ โดยเฉพาะจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

จากผลการศึกษาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [2] เนื่องจากการนำกากมันสำปะหลังไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพยังมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นมีข้อจำกัด ที่มาจากโครงสร้างหลักของกากมันสำปะหลังประกอบไปด้วยลิกโนเซลลูโลส อีกทั้งยังขาดธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ เป็นเหตุให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดได้ไม่สมบูรณ์ในระยะเวลาที่จำกัด อัตราการสร้างก๊าซชีวภาพจึงต่ำ จากงานวิจัยดังกล่าวได้มีการศึกษาต่อเพื่อลดข้อจำกัดในเรื่อง โครงสร้างของกากมันสำปะหลัง ให้มีความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยการปรับสภาพกากมันสำปะหลังด้วยคาร์โบไฮเดรตด้วยสารกรดหรือสารด่างร่วมกับการให้ความร้อน เพื่อย่อยสลายแป้งและหรือเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ หรือสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กอื่นๆ ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ [3] แต่วิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัด คือน้ำตาลรีดิวซ์หรือสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กอื่นๆที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด การนำเหล็กประจุศูนย์เข้ามาช่วยในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบแบบไร้อากาศ อาจเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพในระบบเพิ่มมากขึ้น



ความเป็นมาของมันสำปะหลังในประเทศไทย

มันสำปะหลังจัดเป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง มีชื่อสามัญเรียกหลายชื่อด้วยกันตามภาษาต่างๆที่ได้ยินมาได้แก่ cassava, yuca, mandioca, manioc, madioc, tapioca เป็นต้น มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้แถบประเทศเปรูเม็กซิโก, กัวเตมาลาและฮอนดูรัส ได้แพร่ขยายไปทั่วทวีปอเมริกาแถบร้อน และขยายไปสู่แหล่งอื่นๆของโลก ประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 17 ตามเอกสารที่พบ พบว่ามีการนำมันสำปะหลังเข้ามาในเอเชีย โดยนำเข้ามาในประเทศอินเดีย ศรีลังกา มาเลเซียอินโดนีเซีย สำหรับประเทศไทย ยังไม่มีหลักฐานที่แน่นอนว่ามีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกเมื่อใด คาดว่าจะเข้ามาในระยะเดียวกับที่เข้าสู่ประเทศศรีลังกา ที่ลิปปีนส์ ราวพ.ศ. 2329-2383 เดิมทีคนไทยเรียกว่า มันไม้ มันสำโรง ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียก มันดิน เตี้ย ภาคใต้เรียก มันเทศ (เรียกมันเทศว่ามันหลา) ปัจจุบันคนส่วนใหญ่เรียก มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังจัดเป็นอาหารที่มีความสำคัญเป็นอันดับ 7 ของอาหารมนุษย์ทั่วโลก เป็นอาหารหลักของมนุษย์กว่า 200 ล้านคน โดยรับประทานโดยตรง เลี้ยงสัตว์ กิจการอุตสาหกรรม ประมาณ 95% ของผลผลิตมันสำปะหลังของโลก ใช้เป็นอาหารมนุษย์ ทั้งในรูปแบบอาหารหลักอาหารรอง และอาหารเสริม โดยบริโภคในรูปแบบหัวสด ประมาณหนึ่งถึงสามเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตมันสำปะหลังของโลกใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ มันสำปะหลังอีกส่วนหนึ่งใช้ในการอุตสาหกรรมต่างๆอาหารมากมายหลายชนิดที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง และยังมีอุตสาหกรรมอีกหลายชนิดที่ใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ

สำหรับประเทศไทย มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศมาก เป็นพืชที่มีเนื้อที่ปลูกมากเป็นอันดับสามรองจากข้าว ข้าวโพด และผลิตมันสำปะหลังเป็นอันดับที่สามของทั้งประเทศทั่วโลก รองจากประเทศบราซิลและไนจีเรีย แต่ไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก และทำรายได้เข้าประเทศในปี 2544 ถึง 28,000 ล้านบาท ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของไทยคือ แป้งมันสำปะหลังและมันอัดเม็ด ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 25 และ 74 ของปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังทั้งหมด ซึ่งไทยมีการส่งออกมันอัดเม็ดจำนวน 2.8 ล้านตันในปี 2544 ลดลงจากปี 2543 ถึงร้อยละ 25 โดยตลาดส่งออกมันอัดเม็ดที่สำคัญของไทย ได้แก่ สหภาพยุโรป โดยเฉพาะประเทศเนเธอร์แลนด์ โปรตุเกสและสเปน รวมถึงเกาหลีใต้ ส่วนตลาดนอกสหภาพยุโรปนั้นเป็นตลาดสำหรับแป้งมันสำปะหลังซึ่งประกอบด้วย ได้แก่ ญี่ปุ่น ได้หวัน มาเลเซีย อินโดนีเซียและจีน ประมาณ 97% ของผลผลิตจากมันสำปะหลัง(หัวมันสด) ถูกส่งเข้าโรงงานทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังมากมายหลายชนิด ในจำนวนนี้ประมาณ 70% ของผลผลิตมันสำปะหลังได้ใช้ในการแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ ส่วนที่เหลือนั้นจะใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังออกมากที่สุดในโลกนับเป็นสินค้าที่ทำรายได้จากการส่งออกมากเป็นอันดับสองรองจากข้าว [4]

กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังคือวัสดุเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและโรงงานผลิตฟรุคโตสและสารให้ความหวาน โดยปกติกากแป้งมันสำปะหลังที่ออกจากโรงงานจะมีลักษณะเปียกความชื้นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และมีการใช้กากแป้งมันสำปะหลังเปียกนี้เป็นอาหารสัตว์ อาทิ อาหารโค กระบือ และปลา แต่กากแป้งมันสำปะหลังที่ตากแห้งและใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงผสมกับมันเส้นบดหรือมันอัดเม็ด [5]

1. องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง

โดยทั่วไป กากมันสำปะหลังจะมีองค์ประกอบของแป้งที่สูงถึงประมาณ 40-60% และมีไขมัน โปรตีน เถ้าและเส้นใย รวมถึงไซยาไนด์ และแทนนินที่มีปริมาณลดลงเมื่อตากแดดหรือใช้สารเคมี แสดงในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

ส่วนประกอบ*	Soccol (1994)	Cereda (1994)	Sterz (1997)	Vanden- berghe (1998b)	Sriroth** (2000b)	Sriroth* (2000b)	สถาบันวิจัยและพัฒนา พลังงาน ม.เชียงใหม่** (2008)	
							กพ ¹	ชย ¹
แป้ง	40.50	63.85	63.4	63.0	17.80	68.89	5.56	10.02
ความชื้น	5.02	9.52	10.70	11.20	72.00	-	87.62	83.1
เถ้า	1.10	0.66	1.50	1.44	0.44	1.70	-	-
โปรตีน	1.57	0.32	1.60	1.61	0.40	1.55	-	-
เยื่อใย	50.55	14.88	22.20	21.10	7.17	27.75	2.38	2.0
ไขมัน	1.06	0.83	0.53	0.54	0.03	0.12	-	-
pH	-	-	-	-	4.99	4.99	4.25	4.11

* หน่วย กรัมต่อน้ำหนัก กากแห้ง 100 กรัม

** หน่วย กรัมต่อน้ำหนัก กากเปียก 100 กรัม

กพ¹, ค่าแรงแพเซอร์ ชย¹, ซัยภูมิ

ที่มา : [2]

การปรับสภาพพืช (pretreatment)

องค์ประกอบหลักของลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยเซลลูโลส 40-50% เฮมิเซลลูโลสและลิกนินอย่างละ 20-30 % ของน้ำหนักพืชแห้ง [6] การเปลี่ยนเซลลูโลสในพืชให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์มักมีข้อจำกัดจากปัจจัยหลายด้าน เช่น โครงสร้างพืช ภายภาคทางเคมีของพืช องค์ประกอบทางเคมีในพืช เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับสภาพพืช (pretreatment) เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของลิกโนเซลลูโลสให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาอีกด้วย กระบวนการปรับสภาพพืชจะช่วยกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบที่แทรกอยู่ในเซลลูโลส โดยลดความเป็นผลึกของโครงสร้างเซลลูโลสและเพิ่มลักษณะความเป็นรูพรุนของวัสดุลิกโนเซลลูโลสให้มากขึ้น

เหล็กประจุศูนย์ (Zero valent Iron :ZVI)

เหล็กประจุศูนย์ เป็นวัสดุโลหะราคาถูก อีกทั้งเป็นคาร์บอนซึ่งเจือปนที่แรง หรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ดีเนื่องจากมีศักย์การนำไฟฟ้า ($E^0 = -0.447 \text{ V}$) ต่ำกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมีเทน จึงทำให้อิเล็กตรอนได้ดังสมการ



เนื่องจากคุณสมบัติในการเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี เหล็กประจุศูนย์ยังได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย, การผลิตน้ำบริสุทธิ์จากน้ำบาดาล และการฟื้นฟูดิน [8] สำหรับในการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าเหล็กประจุศูนย์มีความสามารถในการเกิด oxidation-reduction potential (ORP) ซึ่งทำให้แก๊สมีเทนในระบบไร้อากาศเพิ่มขึ้น หลังจากนั้น [7] ได้ศึกษาการนำเหล็กประจุศูนย์เข้ามาในระบบแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ จากการศึกษาพบว่าเมื่อหมักแบบไร้อากาศที่เวลา



20 วัน เหล็กประจุศูนย์สามารถเพิ่มก๊าซมีเทนได้ 21% เมื่อเทียบกับเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มเข้ามาในระบบ 10 g/L เนื่องจากว่าการย่อยสลายของกากตะกอนยังมีข้อจำกัด คือไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้ทั้งหมด [8] จึงได้ทำการศึกษาต่อ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ภายหลังที่มีการปรับสภาพตะกอนการไฮโดรไลซิสด้วยสารกรดร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศที่เวลา 20 วัน ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่าการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มปริมาณเป็น 91.5% เมื่อเทียบกับเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มเข้ามาในระบบ 10 g/L

สรุปวารสารที่เกี่ยวข้อง

พิชชา สวรสุม และคณะ (2550) [2] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง โดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการแบบเดินระบบ ไม่ต่อเนื่อง โดยได้ทำการหาล้อยละของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ โดยทำการแปรผันร้อยละของกากมัน คือ 2,3,5 และ 10% น้ำหนักค่อน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการให้ความร้อนกับกากมันหรือการใช้เอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์เพคตินเนส ก่อนการหมักด้วย ผลการศึกษาพบว่าร้อยละของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ คือ 2-3% ซึ่งให้อัตราการผลิตก๊าซคือ 0.034-0.047 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม กากเปียกการให้ความร้อนกับส่วนผสมกากมันสำปะหลัง 2% ที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีผลการศึกษาพบว่าการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่กลับมีผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพน้อย โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้คือกิโลกรัมของกากเปียกลดลงอยู่ในช่วง 0.033-0.039 ลูกบาศก์เมตรและในการหมักด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเนสในปริมาณ 5-20 NCU/g และ 50-125 PUG/g กากมันแห้ง ตามลำดับ ที่พีเอช 4.5 ด้วยระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาทีก่อนนำมาหมัก ไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนกากมันสำปะหลังเป็นก๊าซชีวภาพได้เช่นเดียวกับการให้ความร้อนก่อนการหมัก อย่างไรก็ตามการใช้เอนไซม์เพคตินเนสที่ปริมาณ 125 PUG/g กากมันแห้ง และเอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 NCU/g กากมันแห้ง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์เซลลูเลสในปริมาณที่ต่ำกว่าและเมื่อทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 NCU/g กากมันแห้งและเอนไซม์เพคตินเนสในปริมาณ 50,80 และ 125 PUG/g กากมันแห้ง พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพไม่มีความแตกต่างกัน และไม่แตกต่างไปจากกรณีที่ใช้เอนไซม์เพคตินเนสที่ปริมาณ 125 PUG/g กากมันแห้ง อย่างมีนัยสำคัญด้วย อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของเวลา การศึกษานี้ได้ทำการทดลองการเอนไซม์ ที่ค่าพีเอชค่าเดียวคือ 4.5 และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 30 นาทีซึ่งอาจจะไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเอนไซม์

Kitikam Sukwanitch (2011) [3] ได้ทำการศึกษา การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยสารกรดและด่างในครั้งนี้ ได้แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการหาปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิส ซึ่งทำโดยแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ปัจจัยที่เลือกศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ส่วนดัชนีที่ใช้ในการประเมิน ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหย ส่วนที่ 2 เป็นการหาผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเลือกสภาวะการไฮโดรไลซิสที่ทำให้เกิดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยมากที่สุดต่างกัน 6 สภาวะจากผลการทดลองส่วนแรก เพื่อนำมาใช้ในการเดินระบบหมักกากมันโดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการแบบที่ต่อเนื่อง ผลจากการศึกษาพบว่า พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมรรถนะการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยสารกรดและสารด่าง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยคือ การไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ค่าพีเอช 0 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยเท่ากับ 855 และ 60.3 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยถึง 214 และ 20 เท่า



จากระดับเริ่มต้น ในส่วนของการไฮโดรไลซ์ด้วยค่าพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดมีค่าต่ำกว่าของการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดอย่างมาก สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า การไฮโดรไลซ์สากมันด้วยสารด่างที่พีเอช 13,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ก่อนนำไปหมักก๊าซ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างเด่นชัด โดยปริมาณก๊าซสะสมภายหลังการหมัก 30 วัน มีค่าเท่ากับ 1.2 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้ง หรือ 0.19 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก ซึ่งมากกว่ากรณีการใช้กากที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์ถึง 3 เท่า ซึ่งในส่วนของไฮโดรไลซ์สากมันด้วยกรดที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยสูงที่สุดนั้น กลับให้ก๊าซในปริมาณต่ำโดยมีค่าต่ำกว่าของกรณีการใช้อากมันที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์

Cuzin N. et al.,(1992) [9] ศึกษาการหมักย่อยเปลือกมันสำปะหลังโดยใช้ถังหมักแบบปลั๊กโฟลว์และทำการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกเท่ากับ $3.6 \text{ kg VS/m}^3 \text{ day}$ และ $4.2 \text{ kg VS/m}^3 \text{ day}$ ปกติในระหว่างกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนจากเปลือกมันสำปะหลัง ซึ่งเปลือกมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของแป้งสูง มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง และมีสารไซยาโนเจนิกกลูโคไซด์ ผลที่ได้คือ มีผลผลิตกรดมากเกิน ขาดแคลนไนโตรเจน และมีการปล่อยสารไซยาโนด์ออกมา ซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน ในการใช้ถังหมักย่อยแบบปลั๊กโฟลว์ สามารถแก้ปัญหาการเกิดกรด ตลอดจนจำกัดระยะเวลาการสร้างกรดในครั้งแรกของถังหมักและแก้ปัญหาการขาดแคลนไนโตรเจน เนื่องจากของเหลวมีการสะสมของไนโตรเจนไว้ และไม่มีกระบวนการของสารไซยาโนด์ (5-6 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งสังเกตได้ในถังหมัก ในกระบวนการหมักจะมีปริมาณของก๊าซชีวภาพเท่ากับ $0.661 \text{ m}^3 \text{ biogas/kg volatile solid (VS)}$ ซึ่งได้มาจากอัตราภาระบรรทุกเท่ากับ $3.6 \text{ kg VS/m}^3 \text{ day}$ สำหรับการคำนวณการประหยัดพลังงาน แสดงให้เห็นว่า การหมักย่อยที่ถังหมักขนาด 88 ลูกบาศก์เมตรสามารถสร้างก๊าซมีเทนซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการอบแห้งของหัวมันสำปะหลังได้ปริมาณ 1 ตัน ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานไปในตัว

ธีรภัทร ศรีนรุตตร และคณะ (2549) [10] ได้ทำการศึกษาการย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในประเทศไทย ซึ่งสามารถทำได้โดยการผ่านขั้นตอนการ pretreatment โดยการไฮโดรไลซ์โดยการใช้อครหรือเอนไซม์ เพื่อเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาลในการศึกษาการไฮโดรไลซ์จะใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.6 M ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนมันสำปะหลังต่อกรดเท่ากับ 1:2 จะได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุทธ้อยู่ที่ 6.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในขณะที่การใช้วิธีไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ผสม พบว่าการใช้เอนไซม์ผสมระหว่างเซลลูโลสและเพคตินเนส ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 4.5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ย่อยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 5.5 เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 4.5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และการนำน้ำตาลที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 8.92 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไปหมักกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR5596 ในถังหมัก *Saccharomyces cerevisiae* ขนาด 10 ลิตร จะได้ปริมาณเอทานอลสูงสุทธ้อยู่ที่ 3.62 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในชั่วโมงที่ 24 คิดเป็นประสิทธิภาพการหมักร้อยละ 91

Tasic, M.B et al., (2009) [11] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแป้งจากหัวมันฝรั่ง โดยการใช้กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก ที่อัตราส่วนระหว่างหัวมันฝรั่งต่อสารละลายกรดแตกต่างกัน อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองคือ 1:0.75 (w/v), 1:1 (w/v) และ 1:2 (w/v) โดยสารละลายกรดทั้งสองชนิดมีความเข้มข้น 1 M และ 2 M ขั้นตอนการศึกษาคือ นำหัวมันฝรั่งบดผสมกับสารละลายกรดให้มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนกระทั่งเดือดประมาณ 60 นาทีและทำการวิเคราะห์หาค่าน้ำตาลรีดิวซ์, Dextrose Equivalent (DE), Reaction rate Constant และ 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) พบว่าความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของมันฝรั่งแต่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายกรดและอัตราส่วนของหัวมันฝรั่งต่อปริมาณสารละลายกรด สำหรับค่า Dextrose Equivalent ที่พบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 94% และมีค่า Reaction rate Constant สูงสุดเท่ากับ 0.089 min^{-1} ส่วนค่า 5-HMF เท่ากับ 0.04 g/L ซึ่งได้จากการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 M และอัตราส่วนหัวมันฝรั่งต่อสารละลายกรดเท่ากับ 1:2 (w/v) สำหรับผลของเอทานอลที่ได้เท่ากับ 31 g/L ได้จาก



การหมักสารละลายมันฝรั่งบดกับสารละลายกรดภายใต้สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้ซีดี ควบคุมอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ประมาณ 18 ชั่วโมง

Y. Zhang et al., (2015) [12] ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพตะกอนก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้ ความร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ร่วมกับการไฮโดรไลซิสด้วยสารต่าง 4 M เป็นเวลา 20 วัน ปริมาณ ตะกอนที่ใช้ 200 มิลลิลิตรอย่างไรก็ตามการปรับสภาพด้วยสารต่างอาจยับยั้งจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทน จึงได้มีการเพิ่มเหล็กประจุ ศูนย์ (ZVI) เข้ามาในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งเหล็กประจุศูนย์ที่มีการทดสอบเป็น ZVI powder (0, 1, 2, 5 and 10 g/L, 0.2 mm diameter, 0.05 m²/g BET surface area, purity >98%) นอกเหนือจาก ZVI ที่ทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซมีเทนเร็วขึ้นยัง พบว่าเหล็กประจุศูนย์สามารถทำให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 91.5% เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม เนื่องจากเหล็กประจุศูนย์เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยน VFA ไปเป็นอะซิเตดได้มากขึ้น ทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดในระบบลดลง 27.6-18.8 มิลลิลิตร ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ที่เพิ่มขึ้น ZVI 0-10 กรัม / ลิตร ทำให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 1.9-32.3 มิลลิลิตร ตามลำดับ

สรุปผลการศึกษา

เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีโครงสร้างที่ซับซ้อน การเปลี่ยนกากมันสำปะหลังไปเป็นก๊าซชีวภาพจึงเกิดขึ้นได้ยาก จากการศึกษาพบว่า หากมีการปรับสภาพกากมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสและการให้ความร้อนจะทำให้พันธะที่ ซับซ้อนของกากมันสำปะหลังกลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยง่ายได้เป็นปริมาณมาก เมื่อนำกากมันสำปะหลังที่ ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ในสภาพตะกอนที่มีความเป็นกรดหรือด่างมากเกินไปยัง จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน ทำให้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณน้อยและไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า หากมีการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์เข้าไปในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากกากมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วย สารกรดหรือสารด่างพร้อมทั้งมีการให้ความร้อนนั้น ถูกเร่งให้เป็นก๊าซมีเทนได้เร็วขึ้น ซึ่งการเพิ่มเหล็กประจุศูนย์เข้าไปใน ระบบอาจเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม สำหรับการเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sriroth, K., Rojanaridpiched, C., Vichukit, V., Suriyaphan, P., Oates, C.G. (2000b). Present situation and future potential of cassava in Thailand. Paper presented at The 6th regional cassava workshop. 11-26 Feb., Ho Chi Minh city, Vietnam.
- [2] พิษยา สวดยสม และคณะ.(2550) รายงานวิจัยเรื่อง สมรรถนะการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและการเพิ่ม ประสิทธิภาพการผลิตด้วยความร้อนหรือเอนไซม์. สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] Kittikam Sukwanitch.,(2011).Comparison of Biogas Production Improvement from Cassava Pulp Between Acid and Alkaline Hydrolysis Processes. Chiang Mai.
- [4] กรมวิชาการเกษตร.(2526). มันสำปะหลัง. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สหสารการพิมพ์. 163 หน้า.
- [5] ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณจากกลกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2550). "การใช้กาก มันสำปะหลังแห้งเป็นอาหารสัตว์." [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.rdi.ku.ac.th/kufair50/animal/11_12_animal/11_2animal.html. (13 มกราคม 2559).
- [6] Sun Y, Zhang J, Lu L, Chen SS, Quinn MT, Weber KT. (2002). Aldosterone-induced inflammation in the rat heart : role of oxidative stress. Waste water 161(5):1773-81.



- [7] Feng, Y., Zhang, Y., Quan, X., Chen, S., (2013). Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron. *Water Res.* 51, 242-250.
- [8] Jiang, Z., Lv, L., Zhang, W., Du, Q., Pan, B., Yang, L., Zhang, Q., (2011). Nitrate reduction using nanosized zero-valent iron supported by polystyrene resins: role of surface functional groups. *Water Res.* 45, 2191-2198.
- [9] Cuzin, N., Farinet, J.L., Segretain, C. and Labat, M. (1992). Methanogenic Fermentation of Cassava Peel Using a Pilot Plug Flow Digester. *Bioresource Technology* 41, 259-264.
- [10] ชีรภัทร ศรีนรคุตร, เตีสถักษณ์ แก้ววิมล และ ละเอียด แซ่โจ้ว. (2549). การย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในประเทศไทย. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [11] Tasic, M.B., Konstantinovic, B.V., Lazic, M.L. and Veljkovic, V.B. (2009). The acid hydrolysis of potato tuber mash in bioethanol production. *Biochemical Tech* 43, 208-210.
- [12] Yaobin Zhang, Yinghong Feng, Xie Quan. (2015). Zero-valent iron enhanced methanogenic activity in anaerobic digestion of waste activated sludge after heat and alkali pretreatment., *Waste Management* 38 (2015) 297-302.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ทำเนียบวิทยากร

ชื่อบทความ	การเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศโดยใช้เหล็กประจุศูนย์
ผู้นำเสนอบทความ	นางสาวอุษา ชิงชล
สถานที่ทำงาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ที่สะดวกให้ติดต่อ	09 3327 9973
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม/วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศไทย
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	นิสิตบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Biogas Production from Cassava Pulp: Review of Current Condition and Future Perspective

Htay Aung Pyae¹, Nittaya Boontian^{2*}, Usa Yingchon¹ and Chalada Piasai¹

^{2*}Assistant Professor, ¹Graduate Student Suranaree University of Technology
Nakhon Rachasima, Thailand 30000

*Phone : 044 224584, Fax : 044 224606, E-mail : n.boontian@sut.ac.th

Abstract

Being the first world's cassava exporter and agriculture dominates the economy, Thailand possesses great potential to source most of the renewable energy from biomass to reduce heavily dependency on fossil fuel. With annual increasing cassava starch production, surplus quantity of cassava pulp was converted into animal feeds and other value added products. Since found the success of generation of biogas from cassava pulp as a major feedstock biogas plant, development of cassava pulp bio-digester increased across the country. However, regardless of any biogas technology or digester types applied, the biogas yield varies within limited range with conventional biogas conversion process. Biogas yield could be enhanced by adopting pretreatment before substrate is fed to digester. Energy caloric value, methane content is another concern for biogas as the average methane contents is ranging between (40-60%), leaving the necessary of further gas purification for power production and mass chemical use. Post-treatment to Biogas may lessen this problem by reduction of CO₂ to CH₄ by mean biological and chemical process. Of several pretreatments to substrate available, the combination of appropriate pretreatment method can enhance biogas yield and the energy value of biogas could be promoted by post-treatment of biogas by hydrogenation and methanogenesis process.

Keywords : cassava pulp; pre-treatment; post-treatment; hydrogenation; methanogenesis

Introduction

Most of the energy that drives our economy and society origins from fossil fuel (i.e. coal, crude oil and natural gas) in which manufacturing industry and transportation sectors are found major energy consumers. Energy experts warn that the fossil energy reserve will exhaust within next decades. Therefore, every nation in their utmost capacity is shifting their dependency on fossil fuel and invest more in into another alternative; renewable energy such as solar, wind, geothermal, nuclear, biomass, tidal and they are gaining more attention than ever. The development of biogas technology and the concept of waste to energy as renewable sources attract developers to invest more in renewable energy while by-products and co-products from manufacturing and process chains could be altered into valuable source for power generation.

Thailand confronts all aforementioned challenges. Heavily depended on imported fossil fuel, it is attempting to cut off energy dependency from regional exporters by supporting energy efficiency and utilization of alternative energy. The energy policy maker of Thailand, Ministry of Energy set series of strategies and policies that enable the Country switching better into alternative energy source by uplifting renewable energy. Out of all energy sources available, Thai Government plan to boost the supply of energy from renewable source from 6.4% in 2008 to 20.3% by the year 2022 [1]. As agriculture sector dominates the state's economy, Thailand can exploit this advantage to enhance the role of renewable energy by sourcing the energy within its biomass and agricultural wastes from agro-industry. Among several energy crops, Thailand commercially produces cassava, rice, sugarcane, corn and Palm oil. The annual cultivation of these energy crops soars as a result of market demand and government supports through subsidies and tariff exemptions. Therefore, the generation of agricultural residues from crops processing is also on the rise creating more opportunity to harness renewable energy from these agricultural residues. This paper reviews the scenario of cassava pulp as common feedstock for biogas production, current biogas technologies and future perspective in Thailand.



Cassava Industry in Thailand

Thailand ranks the first as the world's biggest cassava exporter and the third highest cassava producer, after Nigeria and Brazil. The strength of systematic cassava institution and their concerted efforts in research and development actions result Thailand to harvest higher yield per area than that of Nigeria and Brazil. The stable price, more observation of the applicability of cassava starch in both food and consumable products, and export market stimulates cassava growers to plant more in all regions of Thailand except the South. According to Tapioca Starch Network of Thailand, since 2007, cassava cultivation was increasing having more than 50% in the Northeast, followed by the Central Plain (33%) and the North (15%) of agricultural land. These planted areas included 48 provinces or around 7 million rai (Office of Agricultural Economics, 2007). To this day, based on the survey conducted by Thai Tapioca Starch Association (TTSA), the increase plantation continues. Despite some decrease in yield, according to 2014/2015 figures, the total plantation across Thailand reached over 8.6 million rai, producing over 33.6 million tons on average yield of 3.86 ton/rai. The table (Table 1) under shows the status of cassava production in 2014/2015. TTSA forecasted that the cultivation will increase for the year 2015/2016.

Table 1: Cassava Plantation across Three Province in Thailand (Source: TTSA 2557/58)

Region/Province	Plant Area (rai)	Production (ton)	Yield (ton/rai)	Potential Renewable Energy Sources	
	2014/2015	2014/2015	2014/2015	Cassava Wastewater (m ³)	Cassava Pulp (tons)
Northern	1,975,131	7,516,727	3.806	33,923,471	2,499,624
Northeast	4,459,600	17,451,887	3.913	78,761,485	5,803,477
Central	2,263,217	8,641,873	3.818	39,001,327	2,873,781
Total All Region	8,697,948	33,610,487	3.864	151,686,283	11,176,882

Cassava starch are produced in starch processing factory upon passing production processes such as root preparing and washing, rasping, extraction, separation, drying and Packing. Common by-products are cassava chips/pellet, cassava pulp and cassava wastewater. While the cassava chips/pellet undergo further process for animal feeds, the cassava pulp and wastewater are used for major feedstock for biogas and bioethanol production. In this paper, the significance of cassava pulp for biogas production will be examined. According to cassava starch production process flow shown in figure 1, typically according to figure under (Figure 1) for every one ton of cassava starch requires 4.21 tons of cassava tubers which then generate approximately 19 m³ of cassava wastewater and 1.4 ton of cassava pulp residues.

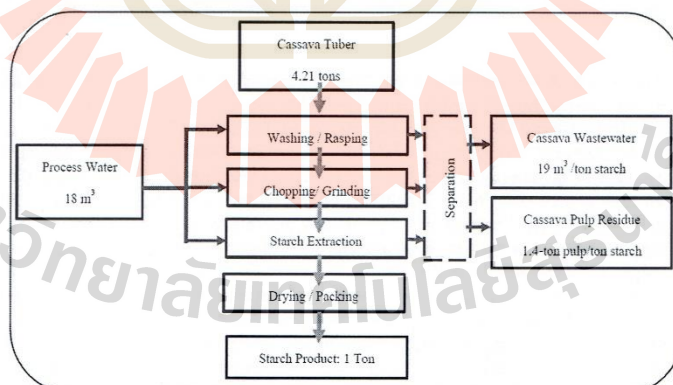


Figure 1: Production Rate of Cassava Pulp and Wastewater in Typical Cassava Starch Factory



Around 70 large scale cassava starch factories which produced 3-4 million tons of processed dry cassava starch annually in Thailand [2]. The cassava pulp generation is ranging between 0.95 – 2.86 tons per a ton of cassava starch output. The figure depends on the choice of manufacturing process, technology and cassava tuber varieties. In total, estimated 6-7 million tons of cassava pulp is being produced each year from cassava starch industry. However, the application of cassava pulp as major substrates remains limited for bio-digester and being targeted as cheap animal feeds and fertilizers. The low protein values in cassava pulp make it unpopular to use them as animal feeds for growth promoter. On the other hand, as the consequence of the increased cassava production, resulting cassava pulp generation from starch mill surpasses the consumption by livestock industries, therefore the surplus bulge of cassava pulp ends as natural fertilizer through composting. This results both economic lost and environmental pollution. The degradation of cassava pulp in the environment release acids and gasses during fermentation and leaching to soil, water sources and nuisance to air. Hence, in order to avert the environmental pollution triggered by conversion into natural fertilizer, utilization cassava pulp as major biomass for bio-digester eliminate these problems. But, the decision to adopt diverse technological options and selection of suitable digester type for utmost biogas production capacity still remains challenging.

Cassava industry can apply concept of waste to energy for producing energy, biogas (methane: CH_4) by using by-products namely cassava wastewater and pulp in a bio-digester. This energy recovery process helps the whole cassava factory to rely on electrical power from its own waste and generates more income from exporting the energy into national power grid. Higher cassava production means more acquisition of biomass/feedstock for bio-digester and the industry becomes more sustainable in renewable energy production. Therefore, to conserve fossil fuel and efficient utilization of energy, agro-industrial wastes possess higher renewable and sustainable potentials than other renewable sources. Taking the advantage of agricultural productivity, Thailand's renewable energy goal is more likely to be met through improvement of energy crop production.

Cassava Pulp and Biogas Technologies in Thailand

The biogas technology was introduced in Thailand during 1960s with small scale digester that used animal manure aiming to produce biogas for cooking purposes. After late 1990s, with the combination of government's support, incentives and development of technological know-how and innovation, the biogas technology and the industry boomed. As of government statistics (2011), there were more than 1800 biogas plants throughout Thailand [1]. Generally, biogas is being produced in four common types of biomass such as industrial, municipal, farm and agro-industrial wastes. Sometime co-digestion among these biomasses is applied for better yield. The production technology is composed of four major processes, namely pretreatment, biogas conversion, biogas upgrading and biogas utilization.

There are 4 major pretreatment process (i.e. physical, chemical, and biological) for biomass before biogas conversion. Except biological pretreatment, in Thailand, the remaining three processes are adopted but the complexity of biomass's physio-chemical properties hinders widespread use of this technology. In biogas conversion technology, reactors are divided into high and slow rate reactors [3]. High rate reactors are those which include Anaerobic Fixed Film (AFF/AF), Up-flow Anaerobic Sludge Bed (UASB), Expanded Granular Sludge Bed (EGSB), Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), Anaerobic Baffle Reactor (ABF), and Plug Flow Reactor (PFR). Low rate reactors are Anaerobic Covered Lagoons (ACL). All reactors undergo the same fundamental of bio-methanation or biogas conversion process but the organic loading rate and configuration of digestion phase decide the selection of reactors type and design; these factors govern operation cost and economic return as well. UASB and CSTR reactors are highly favored in Thailand because of simplicity in operation and running cost. Out of biogas plants built starting 1995 to present day, UASB and CSTR reactors stands 70% of high rate digester category [3]. Following table (Table 2) shows the status of technology adoption for Biogas production in Thailand.


Table 2: Status of Technology development for Biogas Production in Thailand (Source: Warinthorn Songkasiri 2013)

Pretreatment		Biogas Conversion Technogym		Post Treatment	
Methods/ Processes	Status	Methods/ Processes	Status	Technology	Status
High Rate					
Mechanical	Partially	AFF/AF	Fully developed	Hydrogenation	Not Developed
Thermal	Partially	USAB	Fully developed	Electromethanogenesis	Not Developed
Chemical	Partially	EGSB	Fully developed		
Enzyme	Not Developed	CSTR	Fully developed		
		ABF	Fully developed		
		PFR	Fully developed		
		Slow Rate			
		Cover Lagoon	Fully developed		

Cassava Pulp and Current Biogas Yields

Being one of the major by-product of cassava starch industry, cassava pulp contains large amount of carbohydrate. This property is strongly favorable for biogas production. On sampling, cassava pulp has physiochemical properties as in table (Table 3), a chemical oxygen demand (COD) of 1,251 g/kg, dry and volatile solids (VS) of 98% [4]. When cassava pulp as major substrates for biogas production is digested in anaerobic reactor, the bioconversion process taken place under complex set of bacteria that degrade the substrates in symbiotic environment. There are four stages in biogas conversion, that is hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis [5]. The rate of conversion depends on substrate properties and characteristics. Cassava pulp has following physiochemical chemical properties. The rate of bio-methanation and gas yield depends on factors such as pH, Temperature, organic loading, nutrients, carbon/nitrogen (C/N) ration, substrate particle size and inorganic minerals. Inhibition occurs a result of change in these conditions. By bio-methane potential test (BMP), cassava pulp produce ultimate yield of 0.37 l/g VS added [4].

This figure represents maximum specific methane production rate of 36.57 ml/day and 76% biodegradability. On a commercial scale, a typical cassava starch factory, having 200 TPD capacity generates 280 ton/day of cassava pulp with 20% TS and 95% VS, produce about 16000 m³/day of methane gas from operate ABR reactor [6]. Likewise, the project called Khorat Waste-to-Energy, the facility process 750 TPD produce 75000 m³/day of bio-methane [7]. Similarly, Chok Chai Starch, one of the leading cassava starch manufacturer, produces methane of 30000 Nm³/day [8]. Regardless of reactor types adopted, it was found out that biogas has methane, major energy calorific, value of 40 – 65%. Therefore, gas upgrading or purification process which is the post treatment of biogas production plays in crucial role to enrich energy value of biogas. Therefore, the technology to produce biogas containing high methane content is still needed to be innovated to eliminate heavy use of chemicals and the burden of removing inert and toxic gases such as CO₂ and H₂S.



Table 3: Physicochemical Properties of Cassava Pulp (Source: Paepatung, N, 2009)

Moisture	%	81.60
VS	% dry mass	98.07
COD	g/kg dry	1251
Carbon	% dry basis	44.68
Hydrogen	% dry basis	6.31
Nitrogen	% dry basis	1.85
Oxygen	% dry basis	46
Sulphur	% dry basis	0.13
Cellulose	% dry basis	12.56
Lignin	% dry basis	1.86
TKN	g/kg dry	2.76
NH ₃ -N	g/kg dry	0.58
Starch	% dry basis	50

Future Perspective of Biogas Production

The rate of biogas conversion strongly depends upon the performance of bio-reactor and substrate characteristics [5]. Plenty of research and development have been conducted concerning the fundamental and kinetic for biogas processes. However, less emphasis has been paid on pretreatment to enhance biodegradability of substrates though several researches have proved pretreatment of biomass before feeding it into digester help increase the biogas yield. In recent years, various pretreatment technologies have been developed to increase of availability of sugars in hydrolysis, acetic acid in acidogenesis and acetate in acetogenesis. The pretreatment technologies are more relevant for lignocellulosic biomass which includes cassava. The benefits of pretreatment are making Anaerobic Digester faster, increasing biogas yield, improve digestibility in co-digestion with multiple substrates and reducing inhibition at the later phase of digestion [9]. Pretreatment could be done by physical, chemical, biological and combined processes. Chemical and physical pretreatments are found to have great effect on the lignocellulosic materials with low cost and uncomplicated operation, whereas enzymatic process of biological process are time consuming and practically less efficient.

Researches reveal that physical pretreatments such as mechanical crushing, steam explosion, liquid hot water, extrusion and irradiation could improve methane yield from 30% to 220% when different agricultural residues were pretreated to proper particle size, and pressure over time to achieve utmost biodegradability [10]. In case of chemical pretreatments, when lignocellulosic feedstocks were pretreated alkaline, acid, catalyzed steam-explosion, wet oxidation, and ionic liquids process, it was found that methane yield enhanced from 10 to 150% base on technological choice [9]. The demerit of chemical pretreatments is that some method such as oxidative and ionic liquid include complicated process and application of expensive chemical catalysts which may be sometime economically infeasible. Biological pretreatment options consist of fungal, microbial consortium, enzymatic, and ensilaging. Microbes and enzymes activate biomass by minimizing the loss of carbohydrates and maximize the lignin for higher digestibility by enhancing methane yield from 15% 300% during digestion, but compared with physical and chemical pretreatment methods, this method demand less energy input and no chemical [10]. However, long pretreatment time repel developers to use the process in commercial application. Combined pretreatment method could be beneficial due to better biomass utilization and reduce inhibition. In Thailand, co-digestion is more popular in comparison to pretreatment methods in order to enhance biogas yield. Several scholars have been conducting co-digestion with other biomasses, animal manures, food scrap and municipal wastes. But pretreatments method process become more difficult to practice in co-digestion because it includes one or more feedstock in different ratio which restrains correlation between biomass degradability and physicochemical characteristic. Nevertheless, within same reactor, pretreatment methods prove it is highly potential to enhance the rate of biogas production than typical biogas conversion. Future research needs to be done to select specific or combined pretreatment method for each biomass including cassava pulp.



Post treatment process will be another alternative method to increase methane yield. Instead of biomass, the technology focuses on gas content from the anaerobic digester. Typically, biogas contains 50-70% of methane (CH_4), 30- 45% of carbon dioxide (CO_2) and other trace gases such as hydrogen sulfide (H_2S), ammonia (NH_3) and nitrogen (N_2). In recent years, scientists have proved that carbon dioxide (CO_2) could be reduced back to methane (CH_4) through biological and chemical process. The first method being hydrogenation of carbon dioxide (CO_2) by Sabatier reaction [11]. Methane (CH_4) can be obtained by the hydrogenation of carbon monoxide (CO) or carbon dioxide (CO_2). Another hopeful method that convert carbon dioxide (CO_2) into methane (CH_4) is methanogenesis. Methanogens (also called Archaea) produce one billion ton of methane from carbon dioxide naturally every year [12]. By using this organism, in 2009, a group of American scientist had demonstrated that methane can be directly produced using bio-electrode containing methanogens in microbial electrolysis cells [12].

Both of these two methods are purely in preliminary stage and more research is still needed to integrate it for commercial application. The fast technology, hydrogenation of carbon dioxide (CO_2) has the limitation with requirement of highly expensive electrodes and high energy input. The latter having lacking sufficient finding on archaea and microbial electrolysis cell. Though both finding need to be elucidated, the two technologies indicate there is a great potential of producing more methane gas (CH_4) from anaerobic digester by combining the reduction of carbon dioxide (CO_2) to methane (CH_4) into biogas conversion system.

Conclusion

To reduce the use of fossil fuel, Thailand possess high potential of renewable energy sources from agro-industrial residues to produce biogas from the advantage of being the world's first largest cassava starch exporter. The development of biogas conversion technologies and cassava starch industry promotes cassava pulp to be used as major substrates for anaerobic digester. Though the annual biogas production is increasing. However, there is high possibility to improve biogas yield from current production. While, the biogas developers adopt conventional biogas conversation process, like mono-digestion and co-digestion with other substrates to increase biogas yield, there is an alternative way to enhance biogas production rate within same substrate volume by applying pretreatment to the substrates before feeding it into anaerobic reactor and posttreatment to reduce CO_2 back to CH_4 biologically or chemically. For not all methods have positive effect on biogas production, developers need to choose appropriate method base on the substrates' physiochemical characteristics and digester type for optimized economic feasibility. Since energy value decides the applicability of biogas for power generation, current biogas conversion technology shall be examined in order to obtain maximized methane content and reduce the burden of gas purification in downstream gas upgrading process. Therefore, biogas production and methane content from anaerobic digester could be improved by emphasizing in pre-treatment and post-treatment of existing biogas system in Thailand.

References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), Ministry of Energy, *Development strategy and planning of alternative energy for 15 years (2008-2022) in Thailand* (2009).
- [2] Warinthorn Songkasiri, "Waste Minimization and Cleaner Technology in Agro-industry", Excellent Center of Waste Utilization and Management (EcoWaste), 7 June 2013.
- [3] Suwanasri, K., Trakulvichean, S., Grudloyma, U., Songkasiri, W., Commins, T., Chaiprasert, P., & Tanticharoen, M. (2015). Biogas–Key Success Factors for Promotion in Thailand. *Journal of Sustainable Energy & Environment Special Issue*, 25, 30.
- [4] Paepatung, N., Nopharatana, A., & Songkasiri, W. (2009). Bio-methane potential of biological solid materials and agricultural wastes. *Asian Journal on Energy and Environment*, 10(1), 19-27.
- [5] Mata-Alvarez, J., Mace, S., & Llabres, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource technology*, 74(1), 3-16.
- [6] Anders Ek, *Asia Biogas: Case Study of Digestion of Solid Agro-waste Power*
- [7] Cohen, T. (2004). Waste to energy: A waste solutions success in Thailand. *Refocus*, 5(5), 26-28.



- [8] Geoff Matilan. Institution of Chemical Engineers “Thailand’s World First in Waste (Day 275)” 16-Feb-2015. Chok Chai Starch Plant, Uthai Thani, Thailand.
- [9] Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35-53.
- [10] Bruni, E., Jensen, A. P., & Angelidaki, I. (2010). Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. *Bioresource technology*, 101(22), 8713-8717.
- [11] Brooks, K. P., Hu, J., Zhu, H., & Kee, R. J. (2007). Methanation of carbon dioxide by hydrogen reduction using the Sabatier process in microchannel reactors. *Chemical Engineering Science*, 62(4), 1161-1170.
- [12] Cheng, S., Xing, D., Call, D. F., & Logan, B. E. (2009). Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis. *Environmental science & technology*, 43(10), 3953-3958.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Methanogenic Archaea: A Review of Microbial Communities in Anaerobic Digesters

Nittaya Boontian¹, Htay Aung Pyae², Usa Yingschon³ and Chalada Piasai⁴

Introduction

Biogas is a multifunctional renewable energy source, it becomes one of the option to replace the fossil fuels in power and heat production as a feedstock for energy. Therefore, the importance of optimizing the biogas building process is obvious. With the increase of operating biogas plants in the last decade, a lot of studies were carried out for upgrading technical standards and operation modes of digesters. However, current knowledge of biogas reactors and plants is still not sufficient, and many technical and microbial aspects and their interactions have not been investigated comprehensively yet. The recent studies contribute to extend the knowledge of the microbial ecology in biogas reactors and plants. However, the diversity of the microbial community structure and the identification of the most abundant taxonomic groups of microorganisms in biogas fermenters is of great importance. Therefore, precise knowledge of microorganisms' symbiosis could help tracing problems that inhibit substrate degradation and biogas production in anaerobic digesters.

Microbial Synthesis in Anaerobic Digesters

From first phase of metabolic conversion of the substrates (hydrolysis), Hydrolytic bacteria decompose proteins, carbohydrates and lipids [1]. In the subsequent acidogenesis, the metabolic products are converted by fermentative. Most of the participating microorganisms in the first two stages of anaerobic digestion belong to the taxonomic groups of Clostridia, Bacilli, Bacteroidetes and Actinobacteria [2]. For biogas production from renewable resources, the cellulolytic bacteria play a key role in anaerobic digestion because they ensure a most efficient degradation of the applied biomass [3]. During acetogenesis, acetogenic bacteria synthesize VFA and alcohol through symbiosis with hydrogenotrophs [4]. Therefore, most of the hydrogen-producing acetogenic bacteria cannot be grown in pure culture which hampers a good and detailed characterization of those microorganisms [5]. The importance of the symbiotic interaction between hydrogenotrophic methanogens and acetogenic bacteria

is mainly caused by the hydrogen concentration [6]. Hence, the metabolic dependence between acetotrophic bacteria and hydrogenotrophic methanogens can be described as an interspecies hydrogen transfer [7]. Typical representatives of this group belong to the orders of *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*, *Clostridium* and *Acetobacterium* [8, 5]. In the last step of anaerobic digestion (methanogenesis) CO₂, H₂, and acetate or methyl-group containing compounds can directly be converted into methane by methanogenic Archaea.

Methanogenesis

The three main substrates which can be utilized by methanogens are CO₂, acetate and methyl-group containing compounds [9]. Anaerobic digesters using brewery wastewater, palm oil mill effluent, dairy waste, pulp and paper wastewater, and food wastewater have been chosen to study the inhabitation of microbial community.

Among selected Ads, the hydrogenotrophic methanogenesis is the most common metabolic pathway where CO₂ and H₂ are converted to CH₄. Besides H₂, most of the hydrogenotrophs can also use formate as the major electron donor [10]. During hydrogenotrophic methanogenesis the CO₂ is stepwise reduced to methane by special coenzymes (methanofuran, tetrahydromethanopterin, co-enzyme M) through the formyl, methylene and methyl levels.

In the second type of methanogenesis, the acetate is directly converted to methane by acetotrophic methanogenesis. Two major pathways of acetate degradation are known which only differ in the first step. One group of acetotrophic methanogens, the Methanosarcinaceae, uses the acetate kinase phosphotransacetylase system for activating acetate to acetyl-coenzyme A. the second group of acetate converters, Methanosaetaceae is responsible for this reaction [7].

Only a small group of methanogens is able to utilize methyl-group containing compounds such as methanol, methylated amines and methylated sulfides for methane production [10]. During this metabolic pathway the methyl-groups of the methylated compounds are first transferred to the cognate corrinoid protein and afterwards to coenzyme M.

Besides the three main metabolic pathways for methane formation, a CO metabolism could be determined for *Methanothermobacter thermoautotrophicus*, *Methanosarcina barkeri* and *Methanosaeta acetivorans* [11].

According to the phylogenetic tree of life, methanogens are classified in five orders: Methanobacteriales, Methanomicrobiales,

¹Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, Udon Rachasima, 30000, Thailand;
²Graduate Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, Udon Rachasima, 30000, Thailand;
Corresponding author: Tel* 044-224584
Fax: 044-224606
Email: n.boontian@sut.ac.th



Methanosarcinales, Methanococcales and Methanopyrales [10]. Representatives of the first three groups have already been detected in high amounts in digesters and biogas plants whereby Methanococcales seem to play a relatively minor role in anaerobic digesters [12]. Up to now, members of the Methanopyrales could not be detected in biogas fermenters.

Discussion

Methanobacteriales are widely distributed and play a major role for methane [13]. For they use CO₂ or methyl compounds as the main substrate whereby H₂, formate and secondary alcohols serve as electron donors. Therefore, all Methanobacteriales are hydrogenotrophic methanogens. The second strictly hydrogenotrophic order which is commonly detected in fermenters and biogas reactors is the group of the Methanomicrobiales [4]. The absence of the hydrogenotrophic Methanopyrales in digesters can easily be explained because this taxonomic order only could be found in marine hydrothermal systems with temperatures ranging from 84°C to 110°C [10]. Finally, the order of Methanococcales comprises strictly hydrogenotrophic methanogens. They gain their energy by producing methane out of CO₂ using H₂ or formate as the electron donors. Thus far, the presence of this methanogenic group could not be clearly established in biogas fermenters [12].

The widest range of substrate utilization can be found among the methanogens of the order Methanosarcinales. This taxonomic group is divided into two families, Methanosarcinaceae and Methanosaetaceae. Most of the representatives of the Methanosarcinaceae have the ability to utilize CO₂, methylated compounds as well as acetate. Hence, they are often described as mixotrophic methanogens because they use all metabolic pathways of methanogenesis. Members of this methanogenic family play a crucial role in methane formation during anaerobic degradation in biogas fermenters [14]. Different species of Methanosarcinaceae have already been detected in digesters operating under psychrophilic, mesophilic and thermophilic conditions [15]. The second family of Methanosarcinales, the Methanosaetaceae, is a strict acetotrophic group of methanogens. Methanosaetaceae were often detected in biogas reactors working under a mesophilic temperature regime [12]. Methanosaetaceae belong to one of the most important methane producers on earth [16].

References

- [1] Boone, D. R. and Mah, R. (1987) Transitional Bacteria. In *Anaerobic Digestion of Biomass* ed. Chynoweth, D.P. and Isaacson, R. pp. 35-48.
- [2] Souidi, K., Mummé, J., Mundt, K., Nettmann, E. (2007) Microbial diversity in a biogas-producing co-fermentation of maize silage and bovine manure. *Agricultural Engineering Research* **13**, 197-205.
- [3] Zverlov, V.V., Hiegl, W., Köck, D.W., Kellermann, J. and Schwarz, W.H. (2009) Prevalence and role of hydrolytic bacteria in mesophilic and thermophilic biogas reactors. In: *Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009 Band 2* ed. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft pp. 267-282. Freising: ES-Druck.
- [4] Nettmann, E., Bergmann, I., Pramschufner, S., Mundt, K., Plogsties, V., Herrmann, C. and Klocke, M. (2010) Polyphasic Analyses of Methanogenic Archaeal Communities in Agricultural Biogas Plants. *Applied and Environmental Microbiology* **76**, 2540-2548.
- [5] Weiland, P. (2010) Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* **85**, 849-860.
- [6] Kalyuzhnyi, S., Fedorovich, V. and Nozhevnikova, A. (1998) Anaerobic treatment of liquid fraction of hen manure in UASB reactors. *Bioresource Technology* **65**, 221-225.
- [7] Schink, B. (1997) Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* **61**, 262-280.
- [8] Hattori, S. (2008) Syntrophic acetate-oxidizing microbes in methanogenic environments. *Microbes and Environments* **23**, 118-127.
- [9] Shima, S., Warkentin, E., Thauer, R.K. and Ermiler, U. (2002) Structure and function of enzymes involved in the methanogenic pathway utilizing carbon dioxide and molecular hydrogen. *Journal of Bioscience and Bioengineering* **93**, 519-530.
- [10] Garrity, G. and Holt, J.G. (2001) Euryarchaeota. In *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, Vol. 1* ed. Boone, D.R. and Castenholz, R.W. pp. 211-354. New York: Springer Verlag.
- [11] Lessner, D.J., Li, L.Y., Li, Q.B., Rejtar, T., Andreev, V.P., Reichlen, M., Hill, K., Moran, J.J., Karger, B.L. and Ferry, J.G. (2006) An unconventional pathway for reduction of CO₂ to methane in CO₂-grown *Methanosarcina acetivorans* revealed by proteomics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **103**, 17921-17926.
- [12] McHugh, S., Carton, M., Mahony, T. and O'Flaherty, V. (2003) Methanogenic population structure in a variety of anaerobic bioreactors. *Fems Microbiology Letters* **219**, 297-304.
- [13] Leven, L., Eriksson, A.R.B. and Schnurer, A. (2007) Effect of process temperature on bacterial and archaeal communities in two methanogenic bioreactors treating organic household waste. *Fems Microbiology Ecology* **59**, 683-693.
- [14] Narihiro, T., Terada, T., Ohashi, A., Wu, J.H., Liu, W.T., Araki, N., Kamagata, Y., Nakamura, K. and Sekiguchi, Y. (2009) Quantitative detection of culturable methanogenic archaea abundance in anaerobic treatment systems using the sequence-specific rRNA cleavage method. *Isme Journal* **3**, 522-535.
- [15] Collins, G., Woods, A., McHugh, S., Carton, M.W. and O'Flaherty, V. (2003) Microbial community structure and methanogenic activity during start-up of psychrophilic anaerobic digesters treating synthetic industrial wastewaters. *Fems Microbiology Ecology* **46**, 159-170.
- [16] Smith, K.S. and Ingram-Smith, C. (2007) *Methanosaeta*, the forgotten methanogen? *Trends in Microbiology* **15**, 150-155.



Enhancement of Anaerobic Sludge Digestion by Zero Valent Iron: A Review

Usa Yingchon¹, Nittaya Boontian^{2*}, Htay Aung Pyae³ and Chalada Piasai⁴

Introduction

When treating municipal wastewater, the disposal of sludge is a problem of growing importance, representing up to 50% of the current operating costs of a wastewater treatment plant (WWTP). Municipal WWTPs generate sludge as a by-product of the physical, chemical and biological processes used during treatment. Current daily amounts, expressed as dry solids (DS) range from 60 to 90 g DS per population equivalent (p.e.), i.e. nearly 10 million tons of dry sludge per year for the EU.

This sludge must undergo some treatment in order to reduce its associated volumes, to improve its character and to reduce the associated health problems and hindrance. This treatment will hence (i) firstly reduce the water content of the raw sludge, (ii) transform the highly putrescible organic matter into a relatively stable or inert organic and inorganic residue, and (iii) finally condition the residue to meet disposal acceptance regulation. Since land application is difficult due to stringent regulations concerning the tolerated composition, incineration is gaining increasing interest where permits can be obtained.

Anaerobic technologies have been widely used for the treatment of organic industrial wastewater due to low operational cost and high removal efficiency [1]. This is mainly due to the development of high-rate anaerobic reactors, which have the capacity to uncouple solid- and liquid-retention times resulting in high concentrations of biomass [2]. This could be accomplished by self-immobilization of biomass in the form of granules, e.g., in up flow anaerobic sludge bed reactors (UASB) [3]. Anaerobic granular sludge is a dense microbial community that typically includes millions of organisms per gram of biomass, which has proved capable of treating high-strength wastewater contaminated with organic industrial pollutants.

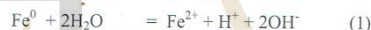
Zero valent iron (ZVI), a strong reducing reagent ($E^0 = -0.447$ V), has been universally used in contaminated site remediation, decolorization of Rhodamine B, degradation of azo dye and microbial removal of perchlorate. Most recently, the promotion for AD using ZVI has also been documented. The preliminary idea of using ZVI is based on the release of hydrogen through electron transfer during ZVI corrosion/oxidation, which can serve as an electron-donor source for methanogens, sulfate reducing bacteria (SRB) or dechlorinating bacteria. For instance, the activities of key enzymes in hydrolysis-

acidification were reported to increase 0.6–1 time through adding ZVI and methane yield raised 43.5%. The purpose of this study effect of zero valent iron on the performance of anaerobic digestion and treatment efficiency was evaluated varies organic loading rate.

Enhancement of anaerobic sludge digestion by zero valent iron (ZVI)

can catalyze the chemical conversion of a variety of pollutants such as chlorinated aliphatic, chlorinated aromatics, nitro aromatics, nitrates, and redox sensitive high valency toxic metals (e.g., Cr^{6+}) or radionuclides (e.g., U^{6+}) [4]. In addition to chemical reactions, ZVI can also serve as an electron donor to support the reductive conversion of contaminants by microorganisms [5]. The best documented examples are microbial mediated dehalogenation of chlorinated aliphatics with the combined use of ZVI and anaerobic microorganisms. Anaerobic mixed cultures were shown to improve the mineralization of the explosive, hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in ZVI columns [6]. Additionally, autotrophic denitrification is feasible utilizing ZVI as the electron donor.

The most accepted mechanism of electron transfer from ZVI to microorganisms is via cathodic hydrogen. Under anaerobic conditions cathodic H_2 is generated by the chemical reaction of H_2O with Fe^0 as indicated below in Eq. 1 [7]:



Field studies have revealed that the microbial density in the ZVI zone of PRBs are from 1 to 3 orders of magnitudes higher in comparison with background soil/groundwater samples [8].

The presence of microorganisms in the reducing zone of the PRB contributes to the corrosion of ZVI. Microbial mediated corrosion results in the deterioration of the reactive media as well the formation of iron precipitates affecting the performance of ZVI. The major precipitates observed in reactive iron barriers include iron oxides, carbonates, iron sulfides, and elemental sulfur.

The type and amount of these precipitates depends on the degree of iron oxidation, groundwater chemistry, and microbial activity. Corrosion and mineral precipitation alter surface composition of ZVI and cause cementation of ZVI particles. Pilot studies have demonstrated that such compositional changes may decrease the reactivity of the iron, and mineral precipitation may decrease flow through the barrier due to loss in porosity and eventually clogging.

* Assistant Professor, ^{1,3 & 4} Graduate Student Suranaree University of Technology Nakhon Rachasima, Thailand 3000.
Corresponding author: Tel: 044 224584,
Fax: 044 224606, e-mail: n.boontian@sut.ac.th



Discussion

The study found that when addition of zero valent iron in anaerobic wastewater treatment makes Enhanced anaerobic digestion. In addition, Fe0 dosing effectively increased the abundance of acidogens, especially acetogens. These results suggest that the enhancement of acidification by Fe0 powder dosing was helpful to improve anaerobic acidogenesis. The production of VFAs was enhanced with ZVI during the hydrolysis and acidification. The methane productivity at ZVI of increased and the sludge reduction ratio increased. The reasons could be ascribed to the following aspects. Firstly, the activities of major enzymes related to hydrolysis and acidification were enhanced after adding ZVI. It made the digestion better catalyzed in the conversion of solid sludge and other complex organics to VFAs. Secondly, ZVI could enhance the growth of H₂-utilizing microorganisms including homoacetogens and hydrogenotrophic methanogens to consume H₂ and then drive the anaerobic digestion. So I will research for more knowledge in the future.

References

- [1] Chandra, R., Takeuchi, H. and Hasegawa, T. (2012) Methane Production from Lignocellulosic Agricultural Crop Wastes: A Review in Context to Second Generation of Biofuel Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1462-1476.
- [2] Comino, E., Rosso, M. and Riggio, V. (2009) Development of a Pilot Scale Anaerobic Digester for Biogas Production from Cow Manure and Why They Mix. *Bioresour. Technol.*, 100, 5072-5078.
- [3] Li, H., Li, C., Liu, W., Zou, S., 2012. Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 123, 189-194.
- [4] Bhattacharya, S.C., Abdul Salam, P. and Sharma, M. (2000) Emissions from Biomass Energy Use in Some Selected Asian Countries. *Energy*, 25, 169-188.
- [5] Schnurer, A. and Jarvis, A. (2009) *Microbiological Handbook for Biogas Plant*. Swedish Waste Management, Swedish Gas Centre, Malmö, 1-74.
- [6] Oh, S.-E., Van Ginkel, S., Logan, B.E., 2003. The relative effectiveness of pH control and heat treatment for enhancing biohydrogen gas production. *Environ. Sci. Technol.* 37, 5186-5190.
- [7] Feng, Y., Zhang, Y., Quan, X., Chen, S., 2013. Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron. *Water Res.* 51,242-250.
- [8] Gerardi, M.H. (2003) *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Wiley, Hoboken, 89-92.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอุษา ยิ่งชล เกิดเมื่อวันที่ 29 กันยายน 2534 เป็นบุตรของคุณพ่อประดับ ยิ่งชล และคุณแม่วรรณา ดวงมาลา เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านหนองถนน จังหวัดบุรีรัมย์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนละหานทรายรัชดาภิเษก จังหวัดบุรีรัมย์ และระดับอุดมศึกษา (ปริญญาตรี) ได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และในปี 2557 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และได้ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยวิจัยโครงการวิจัย ได้แก่ โครงการ “การหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังในระบบ Covered Lagoon” ของบริษัท เสงีสว่างพัฒนาพลังงาน จำกัด และ ผศ. ดร. นิตยา บุญเทียน เป็นหัวหน้าโครงการ โครงการของ STEM ในหัวข้อ “การวิจัยและพัฒนาการเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกากส่า” ร่วมกับบริษัท สเตฟไวส์ เอ็นเนอร์ยี แมเนจเม้นท์ จำกัด และ ผศ. ดร. นิตยา บุญเทียน เป็นหัวหน้าโครงการ โครงการ “การวิจัยและพัฒนากระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีเพื่อเพิ่มก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกากส่า” ร่วมกับบริษัท สเตฟไวส์ เอ็นเนอร์ยี แมเนจเม้นท์ จำกัด เป็นต้น สนับสนุนโครงการโดย สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

ในระหว่างที่ทำการศึกษาได้เผยแพร่บทความทางวิชาการ ดังแสดงในภาคผนวก จ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี