รหัสโครงการ SUT1-104-50-24-51

# รายงานการวิจัย

# มีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน

# (Methane from Cassava Tuber and Cassava Pulp Residue for Using as an Energy Source)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

**รหัสโครงการ SUT1-104-50-24-51**

# รายงานการวิจัย

# มีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน

# (Methane from Cassava Tuber and Cassava Pulp Residue for Using as an Energy Source)

**คณะผู้วิจัย**

**หัวหน้าโครงการ**

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีลักษณ์ รอดทอง**

สาขาวิชาจุลชีววิทยา

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ที่ปรึกษาโครงการ**

**รองศาสตราจารย์ ดร. สิรินทรเทพ เต้าประยูร**

คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550**

**ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว**

กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย “มีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน” เป็นโครงการที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงบประมาณในส่วนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ผ่านการพิจารณาโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ) ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณที่เป็นค่าใช้จ่าย เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการในการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณที่ปรึกษาโครงการวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. สิรินทรเทพ เต้าประยูร คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เรณู ขำเลิศ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวมันสำปะหลัง บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความร่วมมือด้านวัตถุดิบ (หัวมันและกากสำปะหลัง) บริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กากมันสำปะหลัง รวมถึงบุคลากรและนักศึกษาบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มีส่วนช่วยให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้เพื่อผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานทางเลือก โดยใช้หัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง ในระบบถังหมักขั้นตอนเดียวแบบไม่ซับซ้อนระดับห้องปฏิบัติการ ที่มีปริมาตรหมัก 5-50 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส) โดยไม่มีการกวน ผลการศึกษาที่ได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ กล่าวคือ ได้มีเทนที่มีศักยภาพสูงเพียงพอต่อการใช้เป็นแหล่งพลังงาน จากหัวมันสำปะหลังดิบซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยที่ผลิตได้ปริมาณมากและจัดได้ว่ามีมูลค่าต่ำ และจากกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน เมื่อผลิตมีเทนด้วยสภาวะเหมาะสมจากการศึกษาที่ปริมาตรหมัก 50 ลิตร ได้เปรียบเทียบการใช้หัวมันสำปะหลัง 2 พันธุ์ คือ CMR 35-22-196 (ระยอง 11) และ ระยอง 5 มีแป้งร้อยละ 25.56 และ 28.72 ตามลำดับ พบว่าหัวมันสำปะหลังที่เตรียมเป็นชิ้นหัวมันแห้ง (ความชื้นร้อยละ 17.37 และ 14.18 ตามลำดับ) ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 1.0 (จากผลการศึกษาช่วงร้อยละ 0.25-16.0) เติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนร้อยละ 0.04 น้ำหนักต่อปริมาตร (จากการศึกษาแหล่งไนโตรเจนต่างกัน 3 ชนิด) กิจกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์สิ้นสุดภายใน 38 และ 35 วัน ตามลำดับ ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 313 และ 304 ลิตร (หรือ 363 และ 340 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้นร้อยละ 52 และ 56 ตามลำดับ) เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น เท่ากับ 626 และ 608 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่ให้ มีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดร้อยละ 75.9 และ 76.0 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 21 และ 19 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดร้อยละ 52 และ 61 ซึ่งได้มีเทนทั้งสิ้น 161 และ 185 ลิตร เทียบเท่าปริมาณมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้น 322 และ 370 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่ให้ ตามลำดับ สำหรับการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง (ตัวแทนกากมันสำปะหลังที่เลือกมาศึกษามีความชื้นร้อยละ 83 มีแป้งร้อยละ 24.40) นั้น เมื่อใช้กากมันที่เตรียมแห้ง (ความชื้นร้อยละ 15.19) ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 1.0 (จากผลการศึกษาช่วงร้อยละ 0.5-4.0) เติมยูเรียร้อยละ 0.04 น้ำหนักต่อปริมาตร (จากการศึกษาแหล่งไนโตรเจนต่างกัน 3 ชนิด) ในปริมาตรหมัก 50 ลิตร ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 148 ลิตร(หรือ 69 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้นร้อยละ 83) เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น 296 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่ให้ มีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดร้อยละ 75.4 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 38 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดร้อยละ 56 ซึ่งได้มีเทนทั้งสิ้น 82 ลิตร เทียบเท่าปริมาณมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้น 165 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่ให้ ผลการผลิตมีเทนนี้ได้จากใช้เชื้อเริ่มต้นที่ทางโครงการได้พัฒนาขึ้นเป็นเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยแป้งมันสำปะหลังดิบและการผลิตมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง และได้ข้อมูลด้านปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเพื่อการเพิ่มศักยภาพและขยายขนาดการผลิตก๊าซต่อไป

The production of methane in biogas for applying as an alternative source of energy from starch-rich tubers of cassava plant and cassava pulp residue, was investigated in laboratory scale using simple

single-state digesters of 5 to 50-L working volumes and operated at ambient temperature (29-31°C) without stirring. The following achieved results meet the research aims. The high contents of methane that potentially served as an energy source, were obtained from the efficient bioconversion of cassava tuber, one of the cheap and abundant agriculture products in Thailand, and from the cassava pulp residue. When operating the single-state digester of 50-L working volume under optimum conditions investigated in this study, cassava tubers from two plant varieties, CMR 35-22-196 (Rayong 11) and Rayong 5, containing 25.56 and 28.72% of starch, respectively, were compared. The starch-rich tubers were prepared as the dry forms (17.37 and 14.18% moisture content, respectively), then fed into the digester using 1.0% (w/v) total solids (the result obtained from the investigation of 0.25-16.0% total solids) with the supplement of the suitable nitrogen source, 0.04% (w/v) urea (the result from the investigation of 3 types of nitrogen source). Total yields of biogas composing the average methane contents of 52 and 61% (v/v), of 313 and 304 L or 626 and 608 L/kg total solids fed, respectively, were generated. One kilogram of the fresh cassava tubers (52 and 56% moisture content) could be efficiently converted to 363 and 340 L of biogas or 161 and 185 L of methane, respectively. And one kilogram of the dry cassava tubers (17.37 and 14.18% moisture content) could be converted to 322 and 370 L of methane. The maximum methane contents of 75.9 and 76.0% (v/v) were achieved at 21 and 19-day retention times, and fermentation reactions ceased after 38- and 35-day operation, respectively. For cassava pulp residue, a fresh representative sample collected from a tapioca starch factory containing 83% of moisture content and 24.40% of starch, was used to prepare dry cassava pulp containing 15.19% of moisture content for preparing raw cassava pulp slurry. The digester was fed on a batch basis with the slurry containing 1% (w/v) total solids with adding 0.04% urea. The bioconversion performed in 50-L working volume. The total yield of biogas composing the average methane content of 56% (v/v), of 148 L or 296 L/kg total solids fed, was achieved. One kilogram of the fresh cassava pulp (83% moisture content and 24.40% starch) could be efficiently converted to 69 L of biogas or 82 L of methane. And one kilogram of the dry cassava pulp (15.19% moisture content) could be converted to 165 L of methane. The maximum methane content of 75.4 % (v/v) were detected at 38-day retention time, when the fermentation reaction ceased. The high methane contents (75-76%) produced from raw cassava tuber and cassava pulp using the simple single-state digesters, were also resulted from the developed seed cultures having capacity to digest raw cassava starch and produce methane. In addition, data of principle factors affecting methane production from raw cassava tuber and cassava pulp were achieved from this study. The data are useful for enhancing and further scaling up the biogas production.

# สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข
สารบัญ..... ง
สารบัญตาราง..... ช
สารบัญภาพ..... ซ
บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย..... 3
1.5 ทฤษฎีและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย..... 4
1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5
1.6.1 การผลิตก๊าซมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพ..... 6
1.6.2 วิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) เพื่อผลิตก๊าซมีเทน..... 12
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย
2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย..... 14
2.1.1 ครุภัณฑ์..... 14
2.1.2 วัสดุ..... 15
2.1.3 วัตถุดิบ..... 15
2.2 วิธีดำเนินการวิจัย..... 15
2.2.1 การจัดหาและเตรียมวัตถุดิบ..... 15
2.2.2 การเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) และหาวิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้น..... 15
2.2.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบด้านธาตุอาหารของหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง..... 16
2.2.4 การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง..... 18
2.2.5 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง..... 20

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.6 การทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษา..... 20

บทที่ 3 ผลและอภิปรายผลการวิจัย

3.1 การจัดหาและเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตมีเทน..... 21

3.1.1 การจัดหาหัวมันสำปะหลัง..... 21

3.1.2 การจัดหากากมันสำปะหลัง..... 21

3.1.3 การเตรียมวัตถุดิบ..... 21

3.2 การเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture)..... 26

3.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบด้านธาตุอาหารของหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง..... 34

3.4 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทดลองผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพและเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ..... 37

3.4.1 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทดลองผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพ..... 37

3.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ..... 37

3.5 การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง..... 42

3.5.1 การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบ..... 42

3.5.2 การทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง..... 42

3.6 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง..... 43

3.6.1 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันสำปะหลัง..... 43

3.6.1.1 ปริมาณหัวมันสำปะหลังที่เหมาะสม..... 43

3.6.1.2 ชนิดและปริมาณของแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันสำปะหลัง..... 48

3.6.2 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากกากมันสำปะหลัง..... 53

3.6.2.1 ปริมาณกากมันสำปะหลัง (แหล่งคาร์บอน) ที่เหมาะสม..... 53

3.6.2.2 แหล่งไนโตรเจน..... 54

3.7 การทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษา..... 62

3.7.1 การทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลัง..... 62

3.7.2 การทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง..... 71

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8 การสรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในระบบ Single-stage และประเมิน
ความเป็นไปได้ในการใช้ Two-stage digesters……...…….……...……... 76
บทที่ 4 บทสรุป
4.1 สรุปผลการวิจัย..... 80
4.2 ข้อเสนอแนะ..... 89
บรรณานุกรม..... 90
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก ตารางผนวก..... 96
ภาคผนวก ข รูปผนวกกราฟและ Chromatograms..... 130
ประวัติผู้วิจัย..... 134
เอกสารแนบ..... 135

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญตาราง

**หน้า**


ตารางที่ 1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของหัวมันสำปะหลังอบแห้งจำนวน 5 สายพันธุ์…….…… 8

ตารางที่ 1.2 ส่วนประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลังจากที่มีรายงาน…….. 8

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีของหัวมันสำปะหลังอายุโดยเฉลี่ย 8 เดือน จำนวน 8 สายพันธุ์ ที่เก็บรวบรวมจากพื้นที่ปลูกในจังหวัดนครราชสีมา…… 35

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีของกากมันสำปะหลังจำนวน 6 ตัวอย่าง ที่เก็บรวบรวมจากต่างแหล่งผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา……..… 36

ตารางที่ 3.3 กากมันสำปะหลังแห้งที่ใช้ทดลองหมักเพื่อผลิตมีเทน……...…… 36

ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะทางกายภาพของถังปฏิกรณ์/ ภาชนะบรรจุสำหรับการผลิตมีเทน ที่มีปริมาตรบรรจุ 5, 10, 20 และ 50 ลิตร……..…… 37

ตารางที่ 3.5 การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% เติมแหล่งไนโตรเจนต่างชนิดด้วยความเข้มข้นเทียบเท่ากันโดยประเมินจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด……..…… 49

ตารางที่ 3.6 การทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง (ความชื้น 15.19 %) ที่มีค่า Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ปริมาตรหมัก 10, 20 และ 50 ลิตร..…… 55

ตารางที่ 3.7 การผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22 (A, ความชื้น 17.34%) และพันธุ์ระยอง 5 (B, ความชื้น 14.18%) ที่มีค่า Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร……..… 65

ตารางที่ 3.8 การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง (ความชื้น 15.19%) ที่มีค่า Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร……... 72

# สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 ลักษณะของหัวมันสำปะหลังสดอายุโดยเฉลี่ย 8 เดือน ที่ผลิตและจำหน่ายในจังหวัดนครราชสีมา และนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีเพื่อเลือกใช้เป็นวัตถุดิบทดลองผลิตมีเทน..... 22
รูปที่ 3.2 ลักษณะของหัวมันสำปะหลัง ที่ใช้ผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้ของเหลือเป็นกากมันสำปะหลังที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดลองผลิตมีเทน..... 25
รูปที่ 3.3 ลักษณะของชิ้นหัวมันสำปะหลังที่เตรียมเพื่อทดลองใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตมีเทน..... 27
รูปที่ 3.4 ลักษณะของกากมันสำปะหลังสดและกากมันสำปะหลังแห้งที่เตรียมเพื่อให้มีความคงที่ของปริมาณส่วนประกอบของสารอาหารสำหรับการหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน..... 28
รูปที่ 3.5 ลักษณะของเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ที่กระตุ้นให้คุ้นเคยกับการย่อยสลายแป้งจากหัวมันสำปะหลังดิบในถังขนาดบรรจุ 100 ลิตร จำนวน 6 ถัง (ชุดการทดลอง) ที่เติมสารอาหาร ในสัดส่วนและตามช่วงเวลาแตกต่างกัน เชื้อเริ่มต้นที่ว่องไวต่อการหมักให้เกิดก๊าซชีวภาพมีลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าของเหลว..... 29
รูปที่ 3.6 การใช้เชื้อเริ่มต้น (Seed culture) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบหัวมันสำปะหลังในถังบรรจุวัสดุหมักปริมาตร 10 ลิตร..... 33
รูปที่ 3.7 ลักษณะของถังบรรจุวัสดุหมักก๊าซชีวภาพปริมาตร 5 ลิตร อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซโดยการแทนที่น้ำ และถังบรรจุเชื้อเริ่มต้น..... 38
รูปที่ 3.8 ลักษณะของถังบรรจุวัสดุหมักปริมาตร 10 ลิตร ที่เตรียมเพื่อใช้ทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง และอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซโดยการแทนที่น้ำ..... 39
รูปที่ 3.9 ลักษณะของถังบรรจุวัสดุหมักปริมาตร 20 ลิตร ที่เตรียมเพื่อใช้ทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง และอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซโดยการแทนที่น้ำ..... 39
รูปที่ 3.10 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับปริมาตรหมัก 50 ลิตร ที่ต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาตรก๊าซ และถังบรรจุ Seed culture..... 40
รูปที่ 3.11 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ และเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดระหว่างกระบวนการหมัก..... 41

# สารบัญภาพ (ต่อ)

**หน้า**

รูปที่ 3.12 การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) แตกต่างกัน ใน Single-stage digester ปริมาตรหมัก 5 ลิตร..... 44

รูปที่ 3.13 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) เมื่อใช้ Total solids ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 0.25-16.0% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร..... 47

รูปที่ 3.14 การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) โดยใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเติมยูเรียที่ความเข้มข้นต่างกัน ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร..... 50

รูปที่ 3.15 ปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ผลิตได้จากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% และเติมยูเรียที่ความเข้มข้นต่างกัน ใน Single-stage digester ปริมาตรหมัก 5 ลิตร..... 53

รูปที่ 3.16 การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ 0.5-2.0% และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร..... 56

รูปที่ 3.17 Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้ง ที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ 0.5-2.0% และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร..... 58

รูปที่ 3.18 Alkalinity ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้ง ที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ 0.5-2.0% และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร..... 60

รูปที่ 3.19 การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 ที่มีความชื้น 17.34% ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร..... 66

รูปที่ 3.20 Alkalinity และ Volatile fatty acids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 ที่มีความชื้น 17.34% ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร..... 67

รูปที่ 3.21 Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 ที่มีความชื้น 17.34% ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร..... 68

# สารบัญภาพ (ต่อ)

**หน้า**

รูปที่ 3.22 ส่วนประกอบของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพ และค่า Alkalinity และ Volatile fatty acids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการหมักโดยใช้หัวมันสำปะหลังใน Single-stage digesters ที่มีปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร ..... 69

รูปที่ 3.23 การผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก พันธุ์ระยอง 5 ความชื้น 14.18% ใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร..... 70

รูปที่ 3.24 Alkalinity และ Volatile fatty acids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 ความชื้น 14.18% ใช้ Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร..... 70

รูปที่ 3.25 Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 ความชื้น 14.18% ใช้ Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร..... 71

รูปที่ 3.26 การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร..... 73

รูปที่ 3.27 Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร..... 74

รูปที่ 3.28 Alkalinity และ Volatile fatty acids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร..... 75

รูปที่ 3.29 ชุดวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ และชุดทดสอบการจุดติดไฟของก๊าซที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลังใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร..... 78

รูปที่ 3.30 ลักษณะน้ำหมักและกากตะกอนจากการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง เมื่อกระบวนการผลิตก๊าซสิ้นสุดแล้ว ทั้งของเหลวและกากตะกอนมีความเป็นได้ที่จะใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ย..... 79

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เนื่องจาก “วิกฤตน้ำมัน” หรือ “วิกฤตการขาดแคลนแหล่งพลังงาน” ที่กำลังเพิ่มความรุนแรงในทุกประเทศในโลก ณ ปัจจุบัน ซึ่งก็เป็นปัญหาใหญ่ของประเทศไทยจนภาครัฐต้องมีมาตรการการประหยัดพลังงาน ในส่วนของผู้วิจัยได้ศึกษาศักยภาพการใช้หัวมันสำปะหลังดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในเบื้องต้นแล้ว พบว่าการใช้วัตถุดิบหัวมันสำปะหลังดิบในปริมาณน้อยก็สามารถผลิตมีเทน (Methane) ในปริมาณสูงที่เป็นส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพในระดับที่ใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้ (Rodtong and Anunputtikul, 2005) โดยไม่ต้องผ่านการเพิ่มความเข้มข้นหรือกระบวนการต่อเนื่องที่จำเป็นเช่นกระบวนการกลั่นในกรณีการผลิตเอทานอล (Ethanol) และไม่ต้องการขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบที่ต้องลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนก่อนการหมักดังเช่นที่ต้องปฏิบัติในการผลิตเอทานอล ทั้งนี้เมื่อมีการเตรียมกล้าเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยแป้งดิบได้ดี ซึ่งแป้งดิบที่เป็นส่วนประกอบของหัวมันสำปะหลังมีความซับซ้อนและยากต่อการย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพมากกว่าน้ำทิ้งจากการผลิตแป้งมันสำปะหลังเนื่องจากแป้งที่เหลือในน้ำทิ้งหรือของเสียนั้นได้ผ่านกระบวนการทั้งทางเคมีและกายภาพจนมักได้โครงสร้างที่สามารถย่อยสลายต่อทางชีวภาพได้ง่ายขึ้นกว่าแป้งดิบแล้ว

ด้านการผลิตพลังงานเมื่อพิจารณาถึงความเกี่ยวข้องทางเศรษฐกิจตามที่ได้ตรวจสอบจากแหล่งอ้างอิงพบว่าการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพมีต้นทุนต่ำกว่าการผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ และเป็นก๊าซที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นๆ เช่น ไม้ (ฟืน) ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม และไฟฟ้า ได้ดี ดังเช่นที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้เผยแพร่ข้อมูลที่ระบุว่า โดยปกติก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของมีเทนอยู่ประมาณ 60% มีค่าความร้อนอยู่ที่ 21.686 เมกะจูลต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของมีเทนในก๊าซชีวภาพนั้น การนำก๊าซชีวภาพมาผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับที่ผลิตในประเทศไทย มีรายงานประสิทธิภาพอยู่ที่ 1.0-1.4 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรก๊าซชีวภาพ เครื่องยนต์จากต่างประเทศที่ใช้กับก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ มีประสิทธิภาพประมาณ 1.4-1.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 1.2 กิโลวัตต์-ชั่วโมง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2547) ในปี พ.ศ. 2552 กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้เผยแพร่ข้อมูลที่ระบุถึงการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ที่ได้ก๊าซชีวภาพ 0.3-0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม COD (Chemical oxygen

demand) ที่ลดลง มีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 50-80% องค์ประกอบสูงสุดของมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่าความร้อน 39.4 เมกะจูลต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.67 ลิตร ซึ่งเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 10.9 กิโลวัตต์-ชั่วโมง นอกจากนี้กลุ่มพัฒนาพลังงานจากไม้ ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ ได้เปรียบเทียบพลังงานของก๊าซชีวภาพกับพลังงานอื่นๆ โดยประมาณได้ดังนี้ ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร เทียบเท่าก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม หรือน้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร หรือน้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร หรือฟืนไม้ 1.50 กิโลกรัม (Energy Policy and Planning Office, 2005)

ดังนั้นเพื่อศึกษาในเชิงลึกและเตรียมความพร้อมในการผลิตแหล่งพลังงานทดแทนหรือเสริมแหล่งพลังงานธรรมชาติที่กำลังหมดไปจากโลก โครงการวิจัยนี้จึงเป็นโครงการที่ศึกษาถึงการผลิตมีเทน (Methane, $CH_4$) ซึ่งเป็นสารที่มีลักษณะเป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไวไฟ (เป็นก๊าซเชื้อเพลิง) ให้ได้เป็นส่วนประกอบหลักในก๊าซชีวภาพจากการใช้หัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งเป็นการใช้หัวมันสำปะหลังดิบ (ผลผลิตจากการเกษตร) ที่ยังคงจัดอยู่ในกลุ่มที่มีมูลค่าต่ำ และการบำบัดกลิ่นเหม็นที่เกิดจากกองกากมันสำปะหลัง และสิ่งเหลือจากการผลิตมีเทนอาจเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ ในแง่การผลิตมีเทนเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานจากกากมันสำปะหลังนี้ยังได้รับการเสนอปัญหาให้ศึกษาความเป็นไปได้จาก นายทศพล ตันติวงษ์ ประธานกรรมการบริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตและส่งออกแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ของประเทศไทย และขณะนี้บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด ได้ผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงาน แต่ยังคงต้องพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อใช้กากมัน ซึ่งเป็นส่วนเหลือจากการผลิตแป้ง ที่มีมูลค่าต่ำหรือไม่มีเลยในปริมาณประมาณราวหนึ่งพันตันต่อวัน และยังก่อปัญหามลภาวะจากกลิ่นเหม็นแก่ชุมชน เนื่องจากมีปริมาณมากเกินการใช้ประโยชน์ต่อ หากนำกากมันสำปะหลังมาเพิ่มมูลค่าในแง่การผลิตพลังงานที่สามารถใช้และจำหน่ายต่อได้ในราคาสูง จะได้ประโยชน์สูงสุด ประกอบกับในปัจจุบันยังมีข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงที่ใช้กากมันสำปะหลังเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งมีมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก ที่น้อยมากเมื่อเทียบกับข้อมูลของการใช้น้ำเสีย มูลสัตว์ และวัสดุจากพืชที่ไม่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลัก ด้านผู้วิจัยเองก็มีความพร้อมระดับพื้นฐานเนื่องจากได้ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังในเบื้องต้นมาแล้ว อีกทั้งยังอยู่ใกล้แหล่งวัตถุดิบ (หัวมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง) และผู้ประกอบการ (โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง) และผลผลิตมีเทนที่คาดว่าจะได้จากการวิจัยจะมีส่วนช่วยบรรเทาวิกฤตการขาดแคลนแหล่งพลังงานของประเทศไทยได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

โครงการมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้

1) เพื่อให้ได้มีเทนที่มีศักยภาพสูงเพียงพอกับการใช้เป็นแหล่งพลังงาน จากหัวมันสำปะหลังดิบซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทย ที่ผลิตได้ปริมาณมากและจัดได้ว่ามีมูลค่าต่ำ และจากกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน

2) เพื่อให้ได้วิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) และเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยแป้งมันสำปะหลังดิบและการผลิตมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง

3) เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเพื่อการเพิ่มศักยภาพการผลิต

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน โดยมีขอบเขตของการดำเนินงานที่วิจัยกระบวนการผลิตมีเทนจากวัตถุดิบหลักคือหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง ด้วยการพัฒนากระบวนการผลิตตั้งแต่รูปแบบการหมัก การเตรียมวัตถุดิบ การเตรียมเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพ ที่เหมาะสมกับชนิดของวัตถุดิบโดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนเพื่อต้นทุนการผลิตต่ำและเหมาะสมสำหรับประเทศไทย ซึ่งทำให้ได้แหล่งพลังงานทดแทนในภาวะวิกฤตน้ำมันของโลกและประเทศไทย และอาจได้ปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มผลผลิตพืชจากกากที่เหลือจากกระบวนการหมัก ส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์หัวมัน (รวมถึงเศษหัวมันหลังการเก็บเกี่ยว) และกากมันสำปะหลังที่คุ้มค่าขึ้นและมูลค่าเพิ่มของทั้งหัวมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง การวิจัยนี้สืบเนื่องถึงการหาองค์ความรู้ในการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังซึ่งมีข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงอยู่น้อยมาก องค์ความรู้ที่ได้นี้สามารถพัฒนาไปสู่การใช้ผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยให้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจยิ่งขึ้น การจัดการสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมการแปรรูปมันสำปะหลัง และลดปัญหาการกำจัดของเสียและมลภาวะจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้จากผลสำเร็จของการวิจัย มีดังนี้

1) ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนและเหมาะสมสำหรับประเทศไทย ซึ่งทำให้ได้แหล่งพลังงานทดแทนที่ให้ค่าพลังงานที่ไม่ด้อยไปกว่าพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นๆ เช่น ไม้ (ฟืน) ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม และไฟฟ้า และมีการลงทุนผลิตที่โดยเฉลี่ยต่ำกว่าการผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่น ผลผลิตที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถมีส่วนช่วยแก้วิกฤตพลังงานของประเทศไทย
2) กระบวนการผลิตก๊าซมีเทนที่มีศักยภาพสูงที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานจากหัวมันสำปะหลังดิบซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยที่ผลิตได้ปริมาณมากและจัดได้ว่ามีมูลค่าต่ำ และจากกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ในระดับ

ห้องปฏิบัติการ และสามารถพัฒนาเพิ่มระดับการผลิตเพื่อใช้ประโยชน์จริงในระดับครอบครัว (บุคคล) ชุมชน และในเชิงพาณิชย์ของภาคอุตสาหกรรม

3) วิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) และเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยแป้งดิบ และการผลิตมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง ซึ่งวิธีการที่เหมาะสมที่ได้นี้มีความสำคัญต่อการใช้ประโยชน์จุลินทรีย์เฉพาะชนิด/กลุ่มเพื่อผลิตมีเทนจากแป้งได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ
4) องค์ความรู้ในการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังที่เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนและการวิจัยต่อเนื่อง และเผยแพร่แก่ประชาชนและองค์กรที่เกี่ยวข้องในการผลิตมีเทนเพื่อเป็นพลังงานทดแทนและการใช้ประโยชน์หัวมันและกากมันสำปะหลัง
5) ผลผลิตนักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีประสบการณ์จากการเป็นผู้ช่วยวิจัยและนักศึกษาบัณฑิตศึกษาช่วยงานวิจัย

## 1.5 ทฤษฎีและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การผลิตก๊าซมีเทนโดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีโดยอาศัยจุลินทรีย์ เป็นการผลิตพลังงานจากชีวมวลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนก๊าซหุงต้มและพลังงานไฟฟ้าได้ มีเทนจัดได้ว่าเป็นก๊าซที่เผาไหม้แล้วไม่ก่อให้เกิดมลพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพนี้มีหลายรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมูลสัตว์ กรณีหัวมันและกากมันสำปะหลังเท่าที่ทางโครงการได้ตรวจสอบจากแหล่งอ้างอิงที่สามารถค้นคว้าได้ ที่สำคัญจาก Aiman *et al.* (1981) ได้รายงานไว้บ้างแล้วถึงการย่อยสลายกากมันสำปะหลัง สำหรับการศึกษาเพื่อให้ได้ผลสำเร็จของการใช้วัตถุดิบดังกล่าวในการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพยังคงเป็นที่ต้องการ เมื่อคำนึงถึงโรงงานที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตมันสำปะหลังของประเทศไทยแล้ว พบว่าตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจากแหล่งข้อมูลธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย (2549) และสมาคมโรงงานผู้ผลิตมันสำปะหลังภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ระบุว่าผลผลิตมันสำปะหลังรวมของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2548/2549 มีจำนวนทั้งสิ้น 22,584,402 ตัน ได้จากการผลิตในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 12,152,480 ตัน ภาคกลางจำนวน 7,223,504 ตัน และภาคเหนือจำนวน 3,208,418 ตัน ซึ่งเฉพาะในเขตจังหวัดนครราชสีมา มีผลผลิตจำนวน 5,306,169 ตัน และมีโรงงานแป้งมันสำปะหลังจำนวน 15 โรงงาน โรงงานอัดเม็ดมันสำปะหลังจำนวน 18 โรงงาน และลานมันอีกจำนวน 80 ลาน ซึ่งโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมีกระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณใกล้ชุมชนของพื้นที่ปลูกมันสำปะหลัง มิได้ตั้งอยู่ในพื้นที่ของนิคมอุตสาหกรรม ดังนั้นปัญหาที่ชุมชนประสบมาโดยตลอดคือกลิ่นเหม็นของของเสียจากโรงงานที่สร้างความรำคาญและเป็นมลภาวะทางอากาศในบริเวณกว้าง ซึ่งของเสียที่เป็นของแข็ง (กากมันสำปะหลัง) มักกองไว้ในที่โล่งเพื่อจำหน่ายต่อในราคาต่ำ ให้เปล่า หรือกำจัด ทำให้จุลินทรีย์ในธรรมชาติสามารถใช้สารอาหาร

ในกากมันและเกิดกลิ่นเหม็นได้ง่ายในระหว่างรอการเคลื่อนย้ายนั้น ทางโรงงานแป้งมันสำปะหลังเองก็ตระหนักถึงปัญหานี้ จึงได้นำเสนอปัญหาและความต้องการมายังกลุ่มผู้วิจัย ซึ่งการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังมีประโยชน์ในด้านได้พลังงานมาใช้ประโยชน์ ด้านการบำบัดของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพ ลดปัญหามลภาวะจากกลิ่น และกากที่เหลือจากการหมักยังนำมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มผลผลิตพืชอีกด้วย

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียหรือน้ำทิ้งมีความก้าวหน้ามาก แต่จากวัตถุดิบที่เป็นของแข็งยังคงมีการศึกษาวิจัยกัน การดำเนินงานของโครงการนี้เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซมีเทนทั้งจากหัวมันสำปะหลังและกากมันของโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยอาศัยพื้นฐานของการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังที่มีผลสำเร็จในเบื้องต้นแล้ว (Rodtong and Anunputtikul, 2005) เน้นจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยแป้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งดิบได้ในช่วงต้นของการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในกระบวนการหมัก ซึ่งต่างจากการใช้วัสดุหมักที่เป็นมูลสัตว์ เช่น มูลสุกร ที่มักมีการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ง่ายกว่า เน้นปัจจัยทางเคมีและกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการหมัก และถังปฏิกรณ์ที่มีรูปแบบที่ง่ายแต่มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน ผลจากการวิจัยนี้สามารถช่วยขยายขอบเขตของประเภทของวัตถุดิบที่เป็นผลผลิตจากการเกษตรที่สามารถใช้ผลิตมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพและอาจช่วยให้เกิดความร่วมมือและร่วมลงทุนกับภาคเอกชน การพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวยังช่วยเสริมความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจของประเทศและสร้างฐานวิชาการด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานไปพร้อมกัน

## 1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีเทนเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไวไฟ (เป็นก๊าซเชื้อเพลิง) เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนและเกิดขึ้นในรูปของก๊าซผสมที่เรียกว่าก๊าซชีวภาพ ก๊าซผสมดังกล่าวโดยเฉลี่ยประกอบด้วย มีเทน (Methane, $CH_4$, 55-65%) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, $CO_2$, 35-45%) ไนโตรเจน (Nitrogen, $N_2$, 0-3%) ไฮโดรเจน (Hydrogen, $H_2$, 0-1%) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulphide, $H_2S$, 0-1%) (Milono *et al.*, 1981) มีสมบัติติดไฟได้และให้พลังงานความร้อนซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น หุงต้มกับเตาชนิดต่างๆ ตะเกียงให้แสงสว่าง เครื่องกกลูกสัตว์ (สุกรและไก่) เครื่องทำน้ำอุ่น หรือตู้เย็นก๊าซ เป็นต้น กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2547) ได้ระบุถึงค่าพลังงานของก๊าซชีวภาพโดยสรุป คือ ก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของมีเทนอยู่ประมาณ 60% มีค่าความร้อนอยู่ที่ 21.686 เมกะจูลต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของมีเทนในก๊าซชีวภาพ การนำก๊าซชีวภาพมาผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับที่ผลิตในประเทศไทยตามที่มีรายงานประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 1.0-1.4 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรก๊าซชีวภาพ เครื่องยนต์จากต่างประเทศที่ใช้กับก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ มีประสิทธิภาพประมาณ 1.4-1.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร ผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 1.2 กิโลวัตต์-ชั่วโมง กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและ

อนุรักษ์พลังงาน (2552) ได้เผยแพร่ข้อมูลที่ระบุถึงการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ที่ได้ก๊าซชีวภาพ 0.3-0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของ COD ที่ลดลง มีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 50-80% ก๊าซมีเทนที่เป็นองค์ประกอบปริมาณสูงสุดมีค่าความร้อน 39.4 เมกะจูลต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.67 ลิตร ซึ่งเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 10.9 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และกลุ่มพัฒนาพลังงานจากไม้ ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ ได้เปรียบเทียบพลังงานของก๊าซชีวภาพกับพลังงานอื่นๆ โดยประมาณได้ดังนี้ ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร เทียบเท่าก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม หรือน้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร หรือน้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร หรือฟืนไม้ 1.50 กิโลกรัม (Energy Policy and Planning Office, 2005)

ในช่วงปี พ.ศ. 2551-2555 กระทรวงพลังงานได้มีแผนส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในระยะที่ 4 โดยมีกองทุนให้การสนับสนุนแก่ฟาร์มเลี้ยงสัตว์สร้างระบบก๊าซชีวภาพรวมมูลค่ากว่า 488 ล้านบาท ซึ่งมีเป้าหมายรองรับของเสียจากมูลสุกรขุนจำนวน 2 ล้านตัว พร้อมทั้งมีแผนดำเนินการจัดการของเสียและผลิตพลังงาน ครอบคลุมในกิจการที่เกี่ยวเนื่องกับฟาร์มเลี้ยงสัตว์อย่างครบวงจร เช่น การส่งเสริมเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพในโรงฆ่าสัตว์ที่มีขนาดไม่ต่ำกว่า 100 ตัวต่อวัน จำนวน 80 แห่ง หรือเทียบเท่าระบบก๊าซชีวภาพปริมาตร 4,000 ลูกบาศก์เมตร ในกิจการฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดเล็กรองรับสุกรขุนประมาณ 400,000 ตัว และในโรงชำแหละแปรรูปไก่ประมาณ 150,000 ตัวต่อวัน จำนวน 5 แห่ง โดยคาดว่าจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 86 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ทดแทนก๊าซหุงต้มได้จำนวน 3.6 ล้านกิโลกรัมต่อปี น้ำมันเตาเกรดเอ 3.4 ล้านลิตรต่อปี และผลิตไฟฟ้าได้ 86.4 ล้านหน่วยต่อปี

### 1.6.1 การผลิตก๊าซมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพ

วัตถุดิบที่มีรายงานการนำมาใช้เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพมีหลายประเภท ได้แก่ ของเสียจากแหล่งชุมชน (Alaa El-Din *et al*., 1984; Deublein and Steinhauser, 2008) ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Aiman *et al*., 1981; Punyawattoe, 1986; Calzada *et al*., 1984; Deublein and Steinhauser, 2008; Panichnumsin *et al*., 2010) และของเสียจากการเกษตร ได้แก่ มูลสัตว์ (Mackie and Bryant, 1995; Deublein and Steinhauser, 2008; Panichnumsin *et al*., 2010) ของเหลือทิ้งจากพืช ได้แก่ เปลือกมันสำปะหลัง (Cuzin *et al.*, 1992) เปลือกสับปะรด (Tanticharoen *et al*.; 1984) เปลือกกล้วย (Bardiya *et al.*, 1996) ต้นกล้วย (Kalia *et al.*, 2000) ผักตบชวา (Kunawanakit, 1986) และ ฟางข้าว (Zhang and Zhang, 1999, Deublein and Steinhauser, 2008) เป็นต้น

ในประเทศไทยมีการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยนักวิจัยหลายกลุ่ม (เช่น Bhumiratana *et al.,* 1984; Bunchueydee, 1984; Supajunya *et al.,*1984; Punyawattoe, 1986; Tanticharoen *et al*.; 1984; Kunawanakit, 1986; Charoensuksuwan *et al*., 2002; Kimyong *et al*., 2002; Sangklinhom *et al*., 2002; Rodtong and Anunputtikul, 2005) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้มูลสัตว์เป็นวัตถุดิบ ซึ่งนอกจากจะได้แหล่งพลังงานแล้วยังสามารถนำกากเหลือจากการหมักมาใช้เป็นปุ๋ยเพื่อการปรับปรุงบำรุงดินให้มีคุณภาพได้

ดีกว่ามูลสัตว์สด ช่วยลดมลภาวะจากของเสีย ช่วยปรับปรุงสภาพแวดล้อมของฟาร์มและที่อยู่อาศัยให้ดีขึ้น เช่น ลดกลิ่นเหม็น ลดปริมาณหนอนและแมลงวัน ทั้งยังช่วยลดการตัดไม้ทำลายป่าและรักษาสภาพน้ำใต้ดินไม่ให้เสียไปอีกด้วย

สำหรับระบบหมักเพื่อให้ได้มีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบหลัก คือ ถังหมักขั้นตอนเดียว (Single-state digester) และถังหมักสองขั้นตอน (Two-stage digester) (George and Franklin, 1991; Bitton, 1994; Deublein and Steinhauser, 2008) ซึ่ง Two-stage digester พัฒนาจาก Single-state digester ที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์สองถัง ถังแรกเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการย่อยสลายสารอินทรีย์และการหมัก (Initial hydrolysis and fermentative steps) มีการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น ไขมัน แป้ง และโปรตีน ที่อยู่ในรูปสารละลายจนกลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acids) ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์หลายชนิดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (Acid-producing bacteria) จากนั้นกระบวนการผลิตมีเทนจะเกิดขึ้นในถังที่สอง ซึ่งเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน (Methane-producing bacteria) (Hobson and Wheatly, 1993) มีรายงานว่าประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนโดยใช้ Two-stage digester นี้สูงกว่า Single-stage digester เนื่องจากสามารถควบคุมสภาวะสำหรับ Non-methanogenic และ Methanogenic bacteria ได้ Two-stage digester เหมาะสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบที่มีความเป็นกรดและพวกของแข็ง (Punyawattoe, 1986; Carbone *et al.*, 2002)

การศึกษาวิจัยที่ได้ดำเนินการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ใช้หัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ (Rodtong and Anunputtikul, 2005) หัวมันสำปะหลังจัดเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายและยังคงจัดได้ว่ามีมูลค่าต่ำ เมื่อนำมาวิเคราะห์หาส่วนประกอบด้านธาตุอาหารหลักของจุลินทรีย์ พบว่าหัวมันสำปะหลังสด (ทั้งเปลือก) โดยเฉลี่ยมีความชื้น 65% แป้ง 18% ปริมาณคาร์บอน 17% ไนโตรเจน 0.20% และของแข็งทั้งหมด 35% ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์อาจแตกต่างกันขึ้นกับพันธุ์พืชและอายุของหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยว ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กระบวนการหมักแบบขั้นตอนเดียวนี้ได้เตรียมมันสำปะหลังดิบในลักษณะแห้ง (ความชื้น 18.65% ปริมาณคาร์บอน 39.56% ไนโตรเจน 0.46% และของแข็งทั้งหมด 81.35%) เติมหัวเชื้อที่มีประสิทธิภาพในการย่อยแป้งและผลิตมีเทน และเริ่มหมักด้วยปริมาตร 5 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (โดยเฉลี่ย 30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30 วัน พบว่าที่ 1 % (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของของแข็งทั้งหมด และการเติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) (สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 20 ต่อ 1) ให้ผลผลิตของก๊าซ 1.95 ลิตรต่อวัน ที่มีปริมาณมีเทนสูงสุดคือ 67.92% ที่ระยะเวลาการหมัก 10 วัน โดยกระบวนการหมักสิ้นสุดเมื่อหมักได้ 16 วัน และมีปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมด 530 และ 259 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่เติมลงไป ตามลำดับ

Charles *et al.* (2005) ศึกษาองค์ประกอบในหัวมันสำปะหลังที่เตรียมให้อยู่ในรูปแป้ง (Flour) จากมันสำปะหลังสดจำนวน 5 สายพันธุ์ แบ่งเป็นชนิดขม (Bitter variety) คือ พันธุ์ระยอง 5 และ

เกษตรศาสตร์ 50 ชนิดหวาน (Sweet variety) คือ พันธุ์ระยอง 2 พันธุ์ห้านาที และพันธุ์ KMUL36-YOO2 (YOO2) โดยหั่นเป็นชิ้นเล็ก จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และบดละเอียด หัวมันที่ผ่านการอบแห้งนี้มีปริมาณความชื้น (Moisture content) ในช่วง 9-12% มีส่วนประกอบที่เป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) โดยเฉลี่ย 80-86% โปรตีน (Crude protein) ไขมัน (Crude lipid) เยื่อใย (Crude fiber) และเถ้า (Ash) โดยเฉลี่ยในช่วง 1.2-1.8, 0.1-0.8, 1.5-3.5 และ 1.3-2.8% ตามลำดับ (ตารางที่ 1.1)

กรณีกากมันสำปะหลังเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ในการผลิตแป้งมันสำปะหลังถ้าใช้หัวมันสำปะหลัง 100% จะทำให้ได้กากมันสำปะหลัง 7% จากรายงานสถิติการเกษตรปี พ.ศ. 2555 ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่าผลผลิตของหัวมันสำปะหลังสด (สำหรับโรงงาน) ในปี พ.ศ. 2549 มีปริมาณ 22.584 ล้านตัน ดังนั้นจะมีกากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตปริมาณ 1,580,800 ตันต่อปี สำหรับผลผลิตในปี พ.ศ. 2550-2556 มีปริมาณเฉลี่ย 26.089 ล้านตันต่อปี ดังนั้นจะมีกากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตปริมาณถึง 1,826,230 ตันต่อปี

**ตารางที่ 1.1** ส่วนประกอบทางเคมีของหัวมันสำปะหลังอบแห้งจำนวน 5 สายพันธุ์ (กรัมต่อแป้ง 100 กรัม)

| Genotype | Composition (g/100 g) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Moisture | Crude protein | Crude lipid | Crude fiber | Ash | Carbohydrate |
| Rayong 5 | 9.6±0.2 | 1.5±0.2 | 0.4±0.8 | 1.8±0.3 | 1.4±0.5 | 85.4±0.5 |
| KU 50 | 9.6±0.4 | 1.2±0.3 | 0.3±0.6 | 1.5±0.2 | 1.3±0.2 | 86.3±0.4 |
| Rayong 2 | 12.3±0.2 | 1.3±0.5 | 0.2±0.2 | 3.5±0.5 | 2.8±0.4 | 80.1±0.3 |
| Hanatee | 9.2±0.3 | 1.8±0.6 | 0.2±0.3 | 2.5±0.3 | 1.7±0.2 | 84.6±0.4 |
| YOO2 | 10.6±0.6 | 1.5±0.6 | 0.1±0.7 | 3.5±0.5 | 1.9±0.3 | 82.4±0.2 |
| Range | 9.2-12.3 | 1.2-1.8 | 0.1-0.8 | 1.5-3.5 | 1.3-2.8 | 80.1-86.3 |

ที่มา: Charles *et al*. (2005)

องค์ประกอบของกากมันสำปะหลังแตกต่างกันตามแหล่งผลิตที่อาจมาจากหัวมันสำปะหลังหลากหลายสายพันธุ์และต่างอายุเก็บเกี่ยว ตัวอย่างกากมันสำปะหลังที่มีความชื้นโดยเฉลี่ย 5-11% มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยเฉลี่ยในช่วง 40-64% ปริมาณโปรตีน ไขมัน เยื่อใย และเถ้า โดยเฉลี่ยช่วง 0.3-1.6, 0.5-1.1, 21-51 และ 0.7-1.5% ตามลำดับ (ตารางที่ 1.2)

**ตารางที่ 1.2** ส่วนประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลังจากที่มีรายงาน

| Composition | Reference | | | |
|---|---|---|---|---|
| (g/100 g dry weight) | Soccol (1994) | Cereda (1994) | Sterz (1997) | Vandenberghe (1998) |
| Moisture | 5.02 | 9.52 | 10.70 | 11.20 |
| Protein | 1.57 | 0.32 | 1.60 | 1.61 |
| Lipid | 1.06 | 0.83 | 0.53 | 0.54 |
| Fiber | 50.55 | 14.88 | 22.20 | 21.10 |
| Ash | 1.10 | 0.66 | 1.50 | 1.44 |
| Carbohydrate | 40.50 | 63.85 | 63.40 | 63.00 |

ที่มา: Pandey *et al*. (2000)

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ระดับอุตสาหกรรมในปัจจุบันก็เพื่อวัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสีย ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และสามารถช่วยลดการใช้พลังงานของโรงงาน ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้กันนี้มีหลายรูปแบบตั้งแต่รูปแบบที่ง่ายจนถึงซับซ้อน (Bitton, 1994; Deublein and Steinhauser, 2008) ได้แก่ Fixed dome digester เป็นถังปิดรูปโดมมีช่องเติมวัตถุดิบ มูลล้นและทางออกของก๊าซ มักสร้างใต้ดินเพื่อช่วยในการควบคุมอุณหภูมิ เป็นรูปแบบดังเดิมที่เหมาะกับประเทศที่กำลังพัฒนา ระบบหมักแบบ Bag digester เป็นถังหมักรูปทรงกระบอกยาวในแนวนอนมักทำด้วย PVC หรือ Nylon มีถุงสำหรับเก็บก๊าซเป็นส่วนบนราวครึ่งหนึ่งของถัง ระบบหมักแบบ Anaerobic filter (AF) มีถังหมักที่บรรจุ Packing media ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและช่องว่างสูง เป็นที่เกาะของจุลินทรีย์ (แบคทีเรีย) ทำให้สามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้สูง ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียและง่ายต่อการควบคุมระบบ แต่เป็นระบบหมักที่มีค่าก่อสร้าง Packing media ที่สูง และมีปัญหาอุดตันในระยะยาว ระบบหมักแบบ Anaerobic contact (AC) ใช้หลักการนำตะกอนแบคทีเรียที่จมตัวในถังตกตะกอนย้อนกลับมาเติมในถังหมัก ทำให้ถังหมักมีตะกอนแบคทีเรียมาก จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูง แต่มีความยุ่งยากในการออกแบบและควบคุมดูแลระบบ ต้องระวังปริมาณแบคทีเรียในระบบให้ได้เหมาะสม ต้องมีการกวนผสมในถังหมักตลอดเวลา และตะกอนแบคทีเรียจมตัวยาก จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อื่นที่ช่วยทำให้ตะกอนแบคทีเรียจมตัว ระบบหมักแบบ Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) โดยสร้างสภาวะในถังหมักให้แบคทีเรียมีที่มีลักษณะเป็น Granular bacteria ที่เป็นชั้นของ Sludge blanket ที่ก้นถัง แบคทีเรียสามารถเจริญและมีปริมาณเซลล์มาก ทำให้ระบบหมักนี้มีประสิทธิภาพสูง แต่มีความยุ่งยากในการเริ่มต้นเดินระบบ และระบบหมักแบบ Anaerobic baffled reactor (ABR) มีลักษณะเป็นถังหรือบ่อดินที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้ การไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็นในลักษณะไหลขึ้นลงสลับกันหลายครั้ง สามารถใช้กับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง เมื่อน้ำเสียไหลไปตามช่องที่ออกแบบไว้ภายในบ่อ สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะสัมผัสกับจุลินทรีย์ จนความสกปรกลดลงตามลำดับก่อนจะออกจากระบบ ก๊าซชีวภาพที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นจากการย่อยสลายจะลอยขึ้นสู่ด้านบนของถัง เป็นต้น

ปัจจุบันมีการใช้ระบบถังหมักผสม (Hybrid reactor) ของแต่ละระบบดังกล่าวข้างต้น เช่น UASB/AF, UASB/AC, UASB/ AC/AF เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบหมัก และการผลิตยังเป็นไปได้ทั้งแบบกะ (Batch system), Semi-continuous หรือ Continuous fermentation system ที่ส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบประเภทมูลสัตว์ น้ำทิ้งและของเหลือทิ้งจากชุมชน อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ดังกล่าวข้างต้น

นริศรา สิทธิวงศ์ และคณะ (2552) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังตาม Anunputtikul (2004) ที่มีความชื้น 72.53% และส่วนประกอบหลักคือ Organic carbon, Total nitrogen, Crude fiber, Protein และ Total solids เท่ากับ 38.14, 0.72, 3.86, 0.65 และ 27.47% ตามลำดับ ใช้กากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นในรูป Total solids เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0% และยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน (Anunputtikul, 2004) อัตราส่วน C:N ที่ 10:1, 20:1 และ 30:1 ปริมาตรหมัก 3.75 ลิตร ในถังหมักขนาด 5

ลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 44 วัน ตรวจวัดผลผลิตก๊าซโดยต่อหมักเข้ากับถังที่บรรจุ 4N NaOH ก่อนเข้าถังเก็บสะสมก๊าซ พบการผลิตที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 153.5 ลิตร เมื่อใช้กากมันสำปะหลังเข้มข้น 2% (Total solids) และอัตราส่วน C:N เท่ากับ 20:1 กระบวนการหมักสิ้นสุดที่ 44 วันของการหมัก มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 3.49 ลิตรต่อวัน

Parawira *et al*. (2008) ผลิตก๊าซมีเทนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Potato และ Sugar beet leave) ในระบบหมักสองขั้นตอนอย่างง่าย (A simple two-stage anaerobic digestion process) ในถังหมัก Anaerobic digestion และ Methanogen biofilm reactor) ขนาดบรรจุ 10 และ 2.6 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าการผลิตก๊าซมีเทนที่ใช้น้ำหมักจากวัสดุหมักชนิดเดียวจาก Potato, Peeled potato หรือ Beet leave ให้ผลผลิตพลังงานทั้งหมด (Total gross energy yield) ในรูปของมีเทนเท่ากับ 2.5, 3.4 และ 2.1 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม Volatile solids ตามลำดับ และเมื่อใช้วัสดุหมัก Potato และ Beet leave ร่วมกัน 1:2-1:3 สามารถผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 60% ให้ Total gross energy yield เท่ากับ 3.9 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมวัสดุหมัก

Okareh *et al*. (2012) ผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่ประกอบด้วย Bean husk, Cassava peel, Plantain peel และ Yam peel ปริมาณอย่างละ 1 กิโลกรัม ผสมกับมูลสุกรสดปริมาณ 16 กิโลกรัม เติมน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 20 ลิตร (อัตราส่วนวัสดุหมักต่อน้ำเท่ากับ 1:1) หมักในถังหมักขนาดบรรจุ 100 ลิตร เป็นเวลา 16 วัน ตรวจพบจำนวนแบคทีเรีย (ใช้อาหาร Nutrient agar) เท่ากับ $1.5\text{-}3.5\times10^{11}$ CFU/ml จำนวนราและยีสต์ (ใช้อาหาร Potato dextrose agar) เท่ากับ $0.8\text{-}1.4\times10^{4}$ และ $1.8\text{-}2.4\times10^{4}$ SFU/ml ตามลำดับ น้ำหมักในถังมี pH มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 5.2-7.1 โดยลดลงในระยะเริ่มต้นหมักและเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดกระบวนการย่อย มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 26-34 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตก๊าซในช่วง 85.5-314.5 mm $H_2O$ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบด้วย $CH_4$, $NH_3$, $H_2S$ และ $CO_2$ เท่ากับ 70.6, 13.2, 5.3 และ 4.7% ตามลำดับ ข้อได้เปรียบของการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรสดนอกจากจะได้แหล่งพลังงานแล้วยังสามารถนำกากเหลือจากการหมักมาใช้เป็นปุ๋ยเพื่อการปรับปรุงบำรุงดินได้

Panichnumsin *et al*. (2012) เพิ่มผลผลิตมีเทนในการผลิตที่ใช้กากมันสำปะหลังร่วมกับมูลสุกรเป็น Feedstock โดยใช้ระบบหมัก Two-phase anaerobic system ใน Two-phase continuously stirred tank reactor โดยช่วง Hydrolysis/Acidification อยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มี Active volume 0.5 ลิตร Hydraulic retention time (HRT) 2 วัน และ Methanogenic phase ในถังปฏิกรณ์ขนาดบรรจุ 5 ลิตร ที่มี Active volume 3 ลิตร และ HRT 13 วัน พบว่ากิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่ม Hydrolytic/Acidogenic ลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังมากกว่า 50% เนื่องจากมีการยับยั้งด้วย pH ประมาณ 4 และได้ผลผลิตมีเทนสูงสุดที่ 370 มิลลิลิตรต่อกรัม Volatile solids (added) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างกากมันสำปะหลังและมูลสุกรเท่ากับ 60:40 พบว่า Co-digestion ในถังหมัก Two-phase continuously stirred tank reactor ลดค่า Solids ลงได้ 14% และให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น 36% เมื่อเทียบกับการผลิตในถังหมัก Single-phase continuously stirred tank reactor

Imam *et al*. (2013) พัฒนากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุหมักมูลโค (Cow dung) มูลสัตว์ปีก (Poultry waste) และผักตบชวา (Water hyacinth) ด้วยระบบหมักแบบกะ (Batch) ในถังหมักต้นแบบขนาดเล็ก (Small size model biogas plant) ที่รองรับปริมาตรหมัก 0.5-1.0 ลูกบาศก์เมตร ใช้ปริมาณวัสดุหมัก 13.5 กิโลกรัม พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ปีกให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดที่ 0.058 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ผลิตก๊าซชีวภาพปริมาตรสูงสุดที่ 0.026 ลูกบาศก์เมตร ที่ระยะเวลา 8 วันของการหมัก การหมักด้วยวัสดุหมักมูลโคและผักตบชวาให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.034 และ 0.014 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ผลิตก๊าซชีวภาพปริมาตรสูงสุดที่ 0.0263 และ 0.012 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับที่ 26 วันของการหมัก ส่วนประกอบหลักในก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุหมักทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณมีเทน 75.9% เท่ากัน

Larsen *et al*. (2013) ศึกษาการใช้ Crude glycerine จากการผลิต Biodiesel เพื่อเติมในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังที่เข้าสู่ระบบ Anaerobic digestion reactor ที่ใช้ Horizontal semi-continuous flow reactor ด้วยปริมาตร 8.77 ลิตร ใช้ Seed culture ที่ได้จาก Sludge จากบ่อบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังปริมาณ 30% ควบคุมคุมอุณหภูมิที่ 26 องศาเซลเซียส พบว่าการเติม Crude glycerine เข้มข้น 2% ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมีผลเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (ที่มีมีเทน 48.31%) เท่ากับ 1.979 ลิตรต่อลิตรต่อวัน เทียบกับการผลิตที่ไม่เติม Crude glycerine ที่มีอัตราการผลิตเท่ากับ 1.168 ลิตรต่อลิตรต่อวัน และยังมีผลลดปริมาณ Total solids (TS) จาก 81.19 เป็น 55.58% และ Total volatile solids (TVS) จาก 90.21 เป็น 61.45%

Zhang *et al*. (2013) ศึกษาการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลังและ Cassava distillage จากการผลิตเอทานอลในระบบหมัก Single-stage process และ Two-stage process ด้วย Seed culture ที่เตรียมจาก Anaerobic sludge หมักเพื่อย่อยกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมโดยการย่อยด้วยแบคทีเรียย่อยเซลลูโลสในถังหมัก Anaerobic sequencing batch reactor พบว่ากระบวนการผลิตมีเทนในขั้น Methanogenic step มีความเสถียรเมื่อค่า Organic loading rate ต่ำกว่า 20 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน ระบบหมัก Two-step process ให้ค่า Specific methane yield เท่ากับ 0.147 ลิตรต่อกรัม COD ที่ใช้ ซึ่งสูงกว่าระบบหมักแบบ Single-stage process ที่ได้มีเทน 0.125 ลิตรต่อกรัม COD ถึง 17.6%

ตัวอย่างของการผลิตและใช้ประโยชน์มีเทน (ก๊าซชีวภาพ) ในระดับอุตสาหกรรมในประเทศไทย ได้แก่ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังของ บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ที่ผลิตและส่งออกแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ของประเทศไทยและมีของเสียที่เหลือจากอุตสาหกรรมทั้งน้ำเสียและกากมันสำปะหลังที่กลายเป็นปัญหามลภาวะที่สังคมไทยกำลังเพ่งเล็งถึงมาตรการในการบำบัด ปัจจุบันบริษัทฯ ได้ติดตั้งระบบการบำบัดน้ำเสีย (เริ่มใช้งานในปี พ.ศ. 2546) ที่เรียกได้ว่าเป็นโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังแห่งแรกของประเทศไทยและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่นำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตมาเปลี่ยนเป็นพลังงานหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพโดย บริษัท คลีน เอ็นเนอร์จี ดีเวลล็อป-เมนท์ (คลีนไทย) แม้เป็นเพียงการทดลองนำน้ำเสียมาใช้เพียงบางส่วน แต่พลังงานที่ได้สามารถช่วยลด

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเดือนละนับล้านบาทในการซื้อน้ำมันเตานำเข้าจากต่างประเทศ ในปี พ.ศ. 2546 ระบบสามารถจ่ายก๊าซชีวภาพ ที่มีมีเทนเป็นส่วนประกอบประมาณ 62% ทดแทนการนำเข้าน้ำมันเตาให้กับทางโรงงาน 100% ประมาณ 120,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และโรงงานฯ ยังมีแผนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีเทนเมื่อเผาไหม้แล้วจะไม่มีควันดำเกิดขึ้น เป็นพลังงานสะอาดที่ไม่สร้างมลพิษให้แก่โลก (ข้อมูลจาก นายทศพล ตันติวงษ์ ประธานกรรมการ บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด; หนังสือพิมพ์ ผู้จัดการออนไลน์, 2546; Cohen, 2004) ปี พ.ศ. 2552 โครงการโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมจากชีวมวล (Biomass Co-Generation Power Plant) ของบริษัทฯ ได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับ 1 ในการประกวดผลงานด้านพลังงานทดแทน และการอนุรักษ์พลังงานระดับภูมิภาคอาเซียน หรือ “ASEAN Energy Awards 2009” ซึ่งนับเป็นโรงงานผลิตไฟฟ้าก๊าซชีวภาพที่ใหญ่ที่สุดในเอเชีย และอยู่ในโครงการพัฒนาที่สะอาด หรือ CDM Project ของสหประชาชาติ ปัจจุบันบริษัทได้ดำเนินธุรกิจด้านการผลิตและจำหน่ายก๊าซชีวภาพและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งต้นกำลัง ในปี 2556 มีกำลังผลิตก๊าซชีวภาพ 150,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 8 เมกะวัตต์ ขายเป็นเชื้อเพลิงให้กับบริษัทในเครือเพื่อใช้งานกับหม้อต้มไอน้ำทดแทนน้ำมันเตาในการอบมัน ก๊าซชีวภาพที่เหลือนำไปใช้เป็นแหล่งต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้าและจำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงพลังงานในการดำเนินการตั้งโรงผลิตไฟฟ้า 10 ล้านบาท (ข้อมูลจาก นายชัยวัฒน์ โชคถาวร ผู้จัดการทั่วไป บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด; สำนักข่าวไอ.เอ็น.เอ็น. (INN: Independent News Network) ข่าวเศรษฐกิจ วันเสาร์ที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2556)

### 1.6.2 วิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) เพื่อผลิตก๊าซมีเทน

การเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) และมีเทน (Methane) โดยทั่วไปเตรียมจากตะกอนน้ำทิ้งหรือ Sludge และจากมูลสัตว์ เช่น มูลสุกร (Panichnumsin *et al*., 2012) Zhang *et al*. (2013) เตรียม Seed culture สำหรับเป็นเชื้อเริ่มต้นในการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลังและน้ำทิ้งจากการผลิตเอทานอล โดย Seed ที่ใช้เตรียมได้จาก Sludge ที่มี pH เท่ากับ 7.8 และมีค่า Total suspended solids, Volatile suspended solids, Total solids และ Volatile solids เท่ากับ 32.4, 23.6, 35.6, และ 24.4 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับ Seed culture ให้มีสภาพว่องไวสำหรับเป็นกล้าเชื้อหมักโดยเจือจาง Anaerobic sludge ปริมาตร 10 ลิตร ด้วย Cassava distillage ปริมาตร 2 ลิตร บ่มในถังหมักควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน จากนั้นในทุกๆวันเติม Cassava distillage และระบายส่วนเหลวออกด้วยปริมาตร 0.5 ลิตร เท่ากัน จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลและ Seed culture มีสภาพว่องไวพร้อมใช้งานจึงเริ่มกระบวนการหมักโดยการเติมสารละลาย Hydrolysate ที่เตรียมจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยแบคทีเรียเฉพาะ หรือเติม Cassava distillage ในถังหมักโดยตรง Larsen *et al*. (2013) ใช้ Seed culture เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง (Larsen *et al*., 2013) จาก Sludge จากบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลังและใช้ในปริมาณ 30%

ด้านการเตรียม Seed culture จากเชื้อบริสุทธิ์ทั้งที่เป็นเชื้อเดี่ยวและเชื้อผสมเพื่อผลิตมีเทนนั้นมีการศึกษา ได้แก่ Kvesitadze *et al*. (2012) ใช้ *Clostridium thermocellum* GCD7 และ *Clostridium thermosaccharolyticum* GSC2 เป็นเชื้อเริ่มต้นสำหรับการย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ให้ได้สารตั้งต้นของการผลิตมีเทน และใช้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน คือ *Methanoculleus thermophilicus* GML1, *Methanotrix* GMK2 และ *Methanoculleus thermophile* GMH7 เป็นเชื้อเริ่มต้นในการหมักให้ได้ก๊าซชีวภาพและมีเทน โดยเลี้ยง *Clostridium thermocellum* GCD7 และ *Clostridium thermosaccharolyticum* GSC2 ให้เจริญในอาหาร Modified GS-2 ที่ใช้ Cellobiose, Glucose และ Xylose เป็นทั้งแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน ส่วนอาหารที่ใช้เลี้ยงแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนประกอบด้วย $NH_4Cl$, $MgCl_2$ $2H_2O$, KCl, $KH_2PO_4$, $NaHCO_3$, $Na_2S$ และ $CH_3COONa$ เข้มข้น 0.31, 0.25, 0.30, 0.28, 1.0, 0.05 และ 5.0 กรัมต่อลิตร และเติมสารละลาย Micro-elements, Vitamins และ Resazurine ปริมาตร 2.0, 1.0 และ 0.002 มิลลิลิตร ใช้ Ethyl alcohol, Acetic acid และ Butyric acid อัตราส่วน 1.0:1.1:0.2 เป็นสารตั้งต้น เลี้ยงให้เจริญใน Thermophilic condition ควบคุม pH ที่ 7.2 และกวนด้วยอัตราเร็วคงที่ 50 รอบต่อนาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 2

# วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานของโครงการวิจัย มีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน ใช้สถานที่ปฏิบัติงานคือ ห้องปฏิบัติการอาคารเครื่องมือ 2 และ 3 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใช้ครุภัณฑ์และวัสดุ-อุปกรณ์หลัก และมีวิธีดำเนินการดังนี้

## 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

### 2.1.1 ครุภัณฑ์

ครุภัณฑ์หลักที่ใช้มีดังนี้ ถังหมัก/ ภาชนะบรรจุเพื่อการหมักก๊าซชีวภาพสำหรับปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร ตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส (FOC225I Velp® Scientific, Progen Scientific Ltd., U.K.) ตู้แช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส (HLLE-370 Heto, Heto-Holten, Denmark) ตู้อบไอร้อน (Hot air oven; 1375FX Shel Lab, Sheldon Manufacturing, Inc., U.S.A.) เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance, TC-205, Denver Instrument Company, Japan) เครื่องชั่งหยาบ (Pan balance, LB3200D Sartorius, Sartorius AG Göttingen, Germany) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, Mettler delta 320, Mettler-Toledo Ltd., England) เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer, C-MAG HS 7 IKAMAG®, IKA®-WERKE GMBH & CO. KG, Germany) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ (Gas Analyser, Geotechnical Instruments Ltd., England) เครื่องบดผสม (Blender, Waring Comercial, U.S.A.) เครื่องสกัดไขมัน (Soxtec™2050, Auto Fat Extraction System, FOSS, Sweden) เครื่องสกัดใยอาหารหยาบ (Fibertec™2010, Auto Fibre Analysis System, FOSS, Sweden) เตาเผา (Chamber Furnaces, 1100°C-1200°C Chamber Furnanaces CSF 1200, Carbolite®, England) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, 1245PC Shel Lab, Sheldon Mamufacturing Inc., U.S.A.) โถดูดความชื้น (Desiccator) เทอร์โมมิเตอร์ (Red spirit-filled thermometer, Carolina Biological Supply Company, U.S.A.) CNS-2000 Elemental Analyzer (LECO® Corporation, U.S.A.), Flamephotometer (BWB-1, BWB, England), High performance liquid chromatography (Agilent 1200 Series LC System and Module, Agilent Technologies International *Sael*, Morges, Switzerland), Microcentrifuge (Strip-Fuge™, Clover Labs, Taiwan), Micropipette sets (Nichipet EX, Nichiryo, Japan), High speed refrigerated centrifuge (Avanti 26 XPI, Beckman Coulter, Beckman Coulter, Inc., U.S.A.), Spectrophotometer (UV/VISIBLE GBC 916, Scientific Equipment Ltd., Australia), Vortex mixer (Finevortex, FinePCR®, Korea)

**2.1.2 วัสดุ**

วัสดุที่ใช้มีดังต่อไปนี้ เครื่องแก้วพื้นฐานสำหรับปฏิบัติการจุลชีววิทยา หลอดแก้ว ขวดฝาเกลียว ขนาดบรรจุ 250 และ 500 มิลลิลิตร Centrifuge tubes ขนาดบรรจุ 50 และ 250 มิลลิลิตร กรวยกรอง วัสดุสิ้นเปลืองโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เยื่อกรอง (Membrane filter) กระดาษกรอง (Whatman Nos. 1 & 4), Microcentrifuge tubes, Micropipette tips และสารเคมีระดับคุณภาพ Laboratory grade, Commercial grade และ Analytical grade จากบริษัทผู้ผลิตและจำหน่าย ดังนี้ Asia Pacific Chemicals Limited (Ajax, Australia), Carlo Erba Reagenti (Carlo Erba, Italy) และ Sigma (Sigma-Aldrich Inc., U.S.A.)

**2.1.3 วัตถุดิบ**

หัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังสด จากพื้นที่เพาะปลูก และโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา

## 2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยของโครงการเป็นไปตามขั้นตอนดังนี้

**2.2.1 การจัดหาและเตรียมวัตถุดิบ**

จัดหาและเตรียมวัตถุดิบคือหัวมันสำปะหลังดิบจากพื้นที่ปลูก และกากมันสำปะหลังสดจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด เลขที่ 120 หมู่ 4 ถนนราชสีมา-โชคชัย ตำบลหนองบัวศาลา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และบริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด เลขที่ 61 หมู่ 3 ถนนราชสีมา-ปักธงชัย ตำบลหนองจะบก อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

**2.2.2 การเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) และหาวิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้น**

เตรียมเชื้อเริ่มต้นและหาวิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยแป้งมันสำปะหลังดิบและการผลิตมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง โดยเริ่มจากข้อมูลที่มีการศึกษาไว้ตาม Rodtong and Anunputtikul (2005) ซึ่งวิธีการที่เหมาะสมที่ได้นี้มีความสำคัญต่อการใช้ประโยชน์จุลินทรีย์เฉพาะชนิด/กลุ่มเพื่อผลิตมีเทนจากแป้ง (แป้งดิบ) ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ การเตรียมเชื้อเริ่มต้นเริ่มจากการใช้มูลไก่ กากน้ำตาล และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังบ่อพักที่ 1 จากโรงงานในจังหวัดนครราชสีมา ในอัตราส่วน มูลไก่ 100 กรัมต่อลิตร กากน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร น้ำทิ้งจากโรงงาน 25 หรือ 50 ลิตร ผสมในภาชนะปิดที่สามารถระบายก๊าซที่เกิดขึ้นออกจากถังได้บ้าง ขนาดบรรจุประมาณ 100 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยการเติมน้ำสะอาดให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 100 ลิตร เก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 เดือน ในทุกสัปดาห์เติมกากน้ำตาล 100 กรัม และหัวมันสำปะหลังแห้งบด (วัตถุดิบ

ที่ใช้ในการทดลองผลิตมีเทนของการศึกษาโครงการนี้) 250 กรัม ผสมให้เข้ากัน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของส่วนผสม Seed culture ให้ได้ pH ประมาณ 6.8 ด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)

**2.2.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบด้านธาตุอาหารของหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง**

วิเคราะห์ส่วนประกอบด้านธาตุอาหาร (เน้นส่วนประกอบของวัตถุดิบที่เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมีเทน) และปริมาณความชื้นของหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์ผสมเพื่อให้เกิดมีเทน ด้วยใช้วิธีมาตรฐานดังนี้

**1) ปริมาณความชื้น (Moisture)**

หาปริมาณความชื้นของหัวมันและกากมันสำปะหลังตามวิธีมาตรฐาน Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International (2000) โดยอบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง อบและชั่งจนได้น้ำหนักคงที่ ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 5 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนัก อบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่ในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้ง ครั้งละประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่ คำนวณปริมาณความชื้น

**2) ปริมาณแป้ง (Starch)**

วิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมดในหัวมันสำปะหลังและกากมันด้วยวิธี Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) ตาม Dubois *et al.* (1956) ดังนี้ บรรจุสารละลายตัวอย่าง (ที่เตรียมให้มีความเข้มข้น 1% และเจือจาง 100-500 เท่า ด้วยน้ำกลั่น) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง (ตัวอย่างที่วิเคราะห์ควรเจือจางให้มีปริมาณน้ำตาลเข้มข้นอยู่ในช่วง 10-70 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) เติม Phenol (80% โดยน้ำหนัก) ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร หรือ Phenol (5% โดยน้ำหนัก) ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ในหลอดตัวอย่าง เติม Sulphuric acid เข้มข้น 95.5% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที จากนั้นเขย่าสารละลายให้เข้ากัน นำหลอดทดลองที่บรรจุสารผสมสำหรับวิเคราะห์น้ำตาลไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย Spectophotometer ที่ความยาวคลื่นแสง 485 นาโนเมตร และหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในตัวอย่างวิเคราะห์โดยคำนวณจากสมการกราฟมาตรฐาน

**3) ปริมาณอะมิโลส (Amylose) และอะมิโลเพคติน (Amylopectin)**

หาปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในหัวมันสำปะหลังและกากมันตามวิธีของ Sene *et al.* (1997)

**4) ปริมาณ Alpha-Cellulose และ Beta-Cellulose**

หาปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในหัวมันสำปะหลังและกากมันตามวิธีของ Xiao *et al.* (2001) และ Sun *et al.* (2004)

**5) ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total carbon)**

หาปริมาณคาร์บอนทั้งหมดตามหลักการ Infrared radiation detection และ Thermal conductivity detection ด้วยเครื่อง CNS-2000 Elemental Analyzer (LECO® Corporation, U.S.A.)

**6) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)**

หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดตามหลักการ Infrared radiation detection และ Thermal conductivity detection ด้วยเครื่อง CNS-2000 Elemental Analyzer

**7) ปริมาณเยื่อใย (Fiber)**

หาปริมาณใยอาหารในหัวมันสำปะหลังและกากมันตามวิธีมาตรฐาน AOAC (1990) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ อบกระดาษกรองในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใส่ในตู้ดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักตัวอย่างบนกระดาษกรอง 2-3 กรัม (ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) ห่อให้มิดชิด ใส่ลงใน Extraction thimble ปิดด้วยสำลี เติมสารตัวทำละลาย Petroleum ether ใน Round bottom flask ปริมาตร 80 มิลลิลิตร ในเครื่องสกัดไขมัน (Soxtec™2050, Auto Fat Extraction System, Sweden) พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่นและเปิดสวิทซ์ให้ความร้อน ใช้เวลาในการสกัดไขมันประมาณ 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำ Thimble ออกจากเครื่องสกัดไขมัน อบระเหยสารทำละลายในตู้อบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส จนแห้ง ประมาณ 12-24 ชั่วโมง นำตัวอย่างเก็บในตู้ดูดความชื้น ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันออกแล้วให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1 กรัม บรรจุใน Crucible ที่ผ่านการตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนัก (A) นำ Crucible ที่มีตัวอย่างเข้าเครื่องสกัดใยอาหารหยาบ (Fibertec™2010, Auto Fibre Analysis System, Sweden) เติมสารละลาย $H_2SO_4$ เข้มข้น 1.25% ลงใน column ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ให้ความร้อน ใช้เวลาในการย่อยตัวอย่าง 30 นาที เมื่อครบระยะเวลาย่อยให้ล้างตัวอย่างด้วยน้ำร้อน ประมาณ 2-3 ครั้ง เติม NaOH เข้มข้น 1.25% ลงใน Column ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ให้ความร้อน ใช้เวลาในการย่อยตัวอย่าง 30 นาที เมื่อครบระยะเวลาย่อยให้ล้างตัวอย่างด้วยน้ำร้อนประมาณ 2-3 ครั้ง นำถ้วย Crucible ที่มีตัวอย่าง ล้างด้วย 95% Ethanol ครั้งละ 10 มิลลิลิตร ประมาณ 3 ครั้ง อบตัวอย่างที่ผ่านการย่อยในตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ใส่ในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่ (B) เผาตัวอย่างที่ผ่านการอบในเตาเผาอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผา ใส่ในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่ (C) คำนวณหาปริมาณสารเยื่อใยหยาบจากน้ำหนัก (A), (B) และ (C)

**8) ปริมาณเถ้า (Ash)**

หาปริมาณเถ้าในหัวมันสำปะหลังและกากมันตามวิธีมาตรฐาน AOAC International (2000) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 2 กรัม ใส่ลงในถ้วยเคลือบ (Porcelain crucible) ที่ผ่านการเผาในเตาเผาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเก็บไว้ใน

ตู้ดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณเถ้า

**9) ปริมาณฟอสฟอรัส (Phosphorus)**

เตรียมตัวอย่างหัวมันและกากมันสำปะหลังสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธี Wet digestion method และตรวจวัดปริมาณฟอสฟอรัสในตัวอย่างด้วยวิธี Vandomolybdate method ตาม Barton (1948) โดยนำตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงใน Volumetric flask ขนาด 25 มิลลิลิตร เติมน้ำยา Barton ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ปรับปริมาตรให้เป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นและตั้งทิ้งไว้ให้การเกิดสีสมบูรณ์ประมาณ 30 นาที วัดความเข้มข้นของสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยปริมาณฟอสฟอรัสได้จากการคำนวณจากกราฟมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน

**10) ปริมาณโพแทสเซียม (Potassium)**

เตรียมตัวอย่างหัวมันสำปะหลังและกากมันสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมด้วยวิธี Wet digestion method และตรวจวัดปริมาณโพแทสเซียมในตัวอย่างด้วยเครื่อง Flamephotometer (BWB-1, BWB, England)

**2.2.4 การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง**

ทดลองผลิตมีเทนให้ได้เป็นส่วนประกอบหลัก (ในระดับที่ใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ) ของก๊าซชีวภาพ จากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง โดยอาศัยข้อมูลการหมักและถังปฏิกรณ์ที่ได้ศึกษาจากการใช้หัวมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพในเบื้องต้น (Rodtong and Anunputtikul, 2005) ในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาณวัตถุดิบในช่วง 5-50 ลิตร และใช้เชื้อเริ่มต้น (ข้อ 2.2.2) ด้วยระบบ Single-stage digester ในสภาวะการหมักแบบไร้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่มีการผสมด้วยเครื่องมือ เติมกล้าเชื้อ 10% (ปริมาตรต่อปริมาตร) และรักษาสมดุลของความเป็นกรดด่างของน้ำหมักโดยการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 0.25% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เมื่อค่าอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids) ต่อค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) มีค่ามากกว่า 0.8

วิเคราะห์หาค่าต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นและตลอดระยะเวลาการหมักที่มุ่งเน้นจะได้ผลผลิตก๊าซที่มีปริมาณมีเทนสูงสุด ซึ่งค่าที่จะวิเคราะห์หามีดังนี้

**1) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)**

ตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำหมักก๊าซชีวภาพตามวิธีมาตรฐาน AOAC International (2000) และวิธีดัดแปลงของ Zhang and Zhang (1999) โดยการอบภาชนะในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะถึงที่อุณหภูมิห้อง ชั่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ชั่งตัวอย่างน้ำหมักปริมาตร 50 มิลลิลิตร ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนที่บรรจุในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนัก อบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกจาก

ตู้อบ ใส่ในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้งๆละประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมด

**2) ของแข็งระเหยได้ (Volatile solids, VS)**

วัดปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (1990)

**3) ความเป็นด่าง (Alkalinity, A)**

วัดค่าความเป็นด่างด้วยวิธี Titration method ด้วย $H_2SO_4$ เข้มข้น 0.1N จนถึงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5.1, 4.3 และ 3.5 ตามลำดับ ตามวิธีมาตรฐาน AOAC International (2000) ค่า Alkalinity แสดงค่าในรูปมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg as $CaCO_3$/L) ในขณะที่ปริมาณกรดไขมันระเหยแสดงค่าในรูปมิลลิกรัมต่อลิตรของอะซิเตท (mg as Acetate/L)

**4) แป้งที่เหลือในรูปของน้ำตาล**

ตรวจวัดปริมาณแป้งที่เหลือในตัวอย่างน้ำหมักก๊าซชีวภาพที่ผ่านการเลี้ยงเชื้อที่ระยะเวลาต่างๆ ที่เจือจางให้มีปริมาณน้ำตาลเข้มข้นอยู่ในช่วง 10-70 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่เหลือในรูปน้ำตาลด้วย Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

**5) ปริมาณก๊าซชีวภาพ (Biogas volume)**

วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ด้วย Gas counter และด้วยการแทนที่น้ำของก๊าซที่ผลิตได้

**6) มีเทน (Methane) ในส่วนประกอบก๊าซชีวภาพ**

วัดปริมาณมีเทนที่เป็นส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ (Gas Analyzer, Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

**7) ปริมาณกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids, VFA)**

วัดปริมาณกรดไขมันระเหยได้ชนิด Acetic acid, Formic acid และ Butyric acid ในน้ำหมักก๊าซชีวภาพด้วยเทคนิค High-perfomance liquid chromatography (HPLC) ด้วย HPLC (Agilent 1200 Series LC System and Module, Agilent Technologies International *sarl*, Morges, Switzerland) ใช้ Ion exclusion HPLC column (VertiSep$^{TM}$ OA 8 μm HPLC Column, 7.8×300 mm, Vertical Chromatography Co., Ltd., Thailand) แยกวิเคราะห์สารประกอบกรดอินทรีย์ตาม Neves *et al*. (2006) และตรวจวัดปริมาณกรดที่แยกได้โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ด้วย UV detector (Agilent Technologies International *sarl*) ระบุชนิดของกรดที่แยกได้โดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานกรดอินทรีย์ Acetic, Formic และ Butyric acids (Sigma, Sigma-Aldrich, Inc., U.S.A.) และคำนวณปริมาณกรดที่ตรวจวัดได้โดยเทียบ External standard curve ของสารละลายมาตรฐาน Acetic, Formic และ Butyric acids (Sigma, U.S.A.)

**8) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)**

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

**9) อุณหภูมิ (Temperature)**

วัดอุณหภูมิของน้ำหมักก๊าซชีวภาพด้วย Thermometer (Red spirit-filled thermometer) CNS-2000 Elemental Analyzer (LECO® Corporation, U.S.A.)

**2.2.5 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง**

ศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารอาหาร (Nutrient) ที่เป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบและที่จำเป็นต้องเติมลงไปในระบบหมัก ซึ่งจุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้สารอาหารเหล่านั้นในการเจริญและสร้างผลผลิตที่ต้องการ โดยคำนึงถึงสัดส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N ratio) เป็นสำคัญ ทั้งที่เป็นขั้นตอน Hydrolysis/ Acidogenesis โดยเฉลี่ยต้องการ C:N:P:S ratio เท่ากับ 500:15:5:3 ที่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในช่วง 5.2-6.3 จากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วงการสร้างมีเทน จะมี pH ในช่วง 6.7-7.5 (Deublein and Steinhauser, 2008) ด้านอุณหภูมิจากที่มีรายงานการศึกษาการย่อยสลายอินทรีย์และการผลิตก๊าซในสภาพไร้จากออกซิเจนได้ดีนั้นสามารถเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง คือ 25-65 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์ (Bitton, 1994; Mackie and Bryant, 1995) Mesophilic microorganisms ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตมีเทนเจริญได้ดีที่อุณหภูมิช่วง 32-42 องศาเซลเซียส (Deublein and Steinhauser, 2008) การศึกษาครั้งนี้จะดำเนินการที่อุณหภูมิที่สอดคล้องกับกลุ่มของจุลินทรีย์ที่เตรียมและเลี้ยงให้เจริญและสร้างผลผลิตได้ง่ายและได้ดี

**2.2.6 การทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษา**

ทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษาในข้อ 2.2.5

# บทที่ 3

# ผลและอภิปรายผลการวิจัย

การดำเนินงานของโครงการวิจัยการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน ได้ผลดังนี้

## 3.1 การจัดหาและเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตมีเทน

### 3.1.1 การจัดหาหัวมันสำปะหลัง

จัดหาวัตถุดิบหัวมันสำปะหลังสดจากพื้นที่เพาะปลูกและจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา โดยหัวมันสำปะหลังที่รวบรวมได้มีอายุโดยเฉลี่ย 8 เดือน ชุดที่ 1 (Lot 1) จำนวน 5 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ห้วยบง 60, ระยอง 5, ระยอง 7, ระยอง 90 และ CMR 89 (รูปที่ 3.1) ได้รับความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เรณู ขำเลิศ สังกัดสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และหัวมันสำปะหลังสด ชุดที่ 2 (Lot 2) จำนวน 4 สายพันธุ์ ที่มาจากพื้นที่เพาะปลูกต่างกัน คือ พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50, ห้วยบง 60, ระยอง 9 และ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) จากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังของ บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด เลขที่ 120 หมู่ 4 ถนนราชสีมา-โชคชัย ตำบลหนองบัวศาลา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา (รูปที่ 3.1)

### 3.1.2 การจัดหากากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังที่ใช้ศึกษาได้จากกระบวนการเตรียมแป้งจากหัวมันสำปะหลังของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังทั้งจาก บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด และจาก บริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด เลขที่ 61 หมู่ 3 ถนนราชสีมา-ปักธงชัย ตำบลหนองจะบก อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา (รูปที่ 3.2)

### 3.1.3 การเตรียมวัตถุดิบ

เตรียมวัตถุดิบหัวมันสำปะหลังสดใช้ทั้งเปลือก ล้างด้วยน้ำสะอาด ผึ่งให้แห้ง หั่นหัวมันทั้งเปลือกนั้นให้มีขนาดประมาณ 0.2-1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร (รูปที่ 3.3) จากงานวิจัยพื้นฐานของคณะผู้วิจัยใช้วิธีการหั่นให้ได้ขนาดของชิ้นขนาด <0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตากแห้ง (แสงอาทิตย์) เป็นเวลา 2 วัน แต่การดำเนินงานของโครงการนี้ได้พัฒนาการเตรียมวัตถุดิบที่ต้องใช้ในปริมาณมากตลอดโครงการโดยอบแห้งในตู้อบ (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ให้มีความชื้นคงเหลือประมาณ 14-18% แล้วบดหยาบ เก็บบรรจุหัวมันแห้งที่บดแล้วในถุงพลาสติกปิดสนิทในตู้เย็น (อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) เพื่อใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไป

สำหรับกากมันสำปะหลังเก็บรวบรวมจากแหล่งผลิตแป้งมันสำปะหลังได้จำนวน 6 ตัวอย่าง มีความชื้นสูง ปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 77-83% (ตารางที่ 3.2) เน่าเสียได้ง่าย เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติ

ทางเคมีและกายภาพของกากมันระหว่างรอใช้ในการศึกษา จึงเตรียมในรูปกากมันสำปะหลังแห้ง (รูปที่ 3.4) ที่มีความชื้นประมาณ 15% โดยผ่านการอบแห้งในตู้อบทำนองเดียวกับการเตรียมชิ้นหัวมันสำปะหลังแห้ง และเก็บบรรจุถุงพลาสติกปิดสนิทในตู้เย็น (อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) เพื่อใช้ศึกษาตลอดโครงการ

**รูปที่ 3.1** ลักษณะของหัวมันสำปะหลังสด อายุโดยเฉลี่ย 8 เดือน พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (ก), ห้วยบง 60 (ข และ ค), ระยอง 5 (ง), ระยอง 7 (จ), ระยอง 9 (ฉ), ระยอง 90 (ช), CMR 35-22-196 หรือพันธุ์ระยอง 11 (ซ) และ CMR 89 (ฌ) ที่ผลิตและจำหน่ายในจังหวัดนครราชสีมา และนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีเพื่อเลือกใช้เป็นวัตถุดิบทดลองผลิตมีเทน

**รูปที่ 3.1** (ต่อ) ลักษณะของหัวมันสำปะหลังสด อายุโดยเฉลี่ย 8 เดือน พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (ก), ห้วยบง 60 (ข และ ค), ระยอง 5 (ง), ระยอง 7 (จ), ระยอง 9 (ฉ), ระยอง 90 (ช), CMR 35-22-196 หรือพันธุ์ระยอง 11 (ซ) และ CMR 89 (ฌ) ที่ผลิตและจำหน่ายในจังหวัดนครราชสีมา และนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีเพื่อเลือกใช้เป็นวัตถุดิบทดลองผลิตมีเทน

**รูปที่ 3.1** (ต่อ) ลักษณะของหัวมันสำปะหลังสด อายุโดยเฉลี่ย 8 เดือน พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (ก), ห้วยบง 60 (ข และ ค), ระยอง 5 (ง), ระยอง 7 (จ), ระยอง 9 (ฉ), ระยอง 90 (ช), CMR 35-22-196 หรือพันธุ์ระยอง 11 (ซ) และ CMR 89 (ฌ) ที่ผลิตและจำหน่ายในจังหวัดนครราชสีมา และนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีเพื่อเลือกใช้เป็นวัตถุดิบทดลองผลิตมีเทน

**รูปที่ 3.2** ลักษณะของหัวมันสำปะหลัง (ก) ที่ใช้ผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้ของเหลือเป็นกากมันสำปะหลัง (ข) ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดลองผลิตมีเทน

**3.2 การเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed culture)**

เตรียมเชื้อเริ่มต้นและหาวิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยแป้งมันสำปะหลังดิบและการผลิตมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง วิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้นมีความสำคัญต่อการใช้ประโยชน์จุลินทรีย์เฉพาะชนิด/กลุ่มเพื่อผลิตมีเทนจากแป้ง (แป้งดิบ) ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ การเตรียมเชื้อเริ่มต้นได้ใช้กรรมวิธีตาม Rodtong and Anunputtikul (2005) โดยเริ่มจากการใช้มูลไก่ กากน้ำตาล และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา ในสัดส่วน มูลไก่ 100 กรัมต่อลิตร กากน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร น้ำทิ้งจากโรงงาน 25 หรือ 50 ลิตร ผสมในถังบรรจุน้ำมีฝาปิดขนาดบรรจุปริมาตรประมาณ 50 หรือ 100 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยการเติมน้ำสะอาดหรือน้ำประปาให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 50 หรือ 100 ลิตร เก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 เดือน ในทุกสัปดาห์ระหว่างเก็บเติมกากน้ำตาล 1.0 กรัมต่อลิตร และหัวมันสำปะหลังบด (วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองผลิตมีเทนของการศึกษาโครงการนี้) 2.5 กรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากัน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของส่วนผสม Seed culture ให้ได้ pH ประมาณ 6.8 ด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) จากนั้นได้พัฒนากรรมวิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้นต่อจำนวน 6 ชุดการทดลอง (รูปที่ 3.5) จนได้ขั้นตอนที่เหมาะสม (ชุดการทดลองที่ 1 รูปที่ 3.5 ข-ง) เป็นลำดับดังนี้ ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังที่เจือจางลง 1 เท่า เติมมูลไก่ 100 กรัมต่อลิตร บ่มในถังมีฝาปิดที่พอระบายก๊าซที่เกิดขึ้นได้ และมีการเติมแป้งจากหัวมันสำปะหลังดิบที่เตรียมในรูปวัตถุดิบแห้งเพื่อใช้ทดลองผลิตมีเทนปริมาณ 0.02% (น้ำหนักโดยปริมาตร) ทุกๆ 3 วัน ในช่วง 1 เดือนแรก พร้อมทั้งควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 5-7 ด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ติดตามการเปลี่ยนแปลงของของเหลวเป็นเวลา 3 เดือน (รูปที่ 3.5) จากนั้นเติมกากน้ำตาล 1.0 กรัมต่อลิตร และแป้งจากหัวมันสำปะหลัง 2.5 กรัมต่อลิตร ในทุก 2 สัปดาห์ สังเกตจากลักษณะปรากฏของเชื้อเริ่มต้นที่ว่องไว (active) ในการใช้ผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง (รูปที่ 3.5 และ 3.6) ควรมีฟองก๊าซที่ผิวหน้าของเหลว ปรับค่า pH ของของเหลวให้อยู่ประมาณ 6.8 เชื้อเริ่มต้นที่มีอายุ 2 เดือน สามารถนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลังอย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาตรเชื้อเริ่มต้นที่นำออกจากถังเลี้ยงไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพไม่เกิน 10 ลิตรต่อครั้ง สามารถเติมน้ำประปาหรือน้ำสะอาดลงไปทดแทนได้ หากมีการใช้ต่อครั้งมากกว่า 10 ลิตร ทดแทนปริมาตรด้วยการเติมน้ำทิ้งจากบ่อพักแรกของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง เจือจางเท่าตัวด้วยน้ำประปาหรือน้ำสะอาด

**รูปที่ 3.3** ลักษณะของชิ้นหัวมันสำปะหลังที่เตรียมเพื่อทดลองใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตมีเทน
(ก) หัวมันสำปะหลังสดทั้งเปลือกที่หั่นให้มีขนาดประมาณ 0.2-1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร
(ข) ชิ้นของหัวมันสำปะหลังแห้งที่มีปริมาณความชื้น 17% โดยประมาณ
(ค) ชิ้นของหัวมันสำปะหลังแห้งที่ผ่านการบดหยาบด้วยเครื่องบดผสม

(ก) กากมันสำปะหลังสดจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

(ข) กากมันสำปะหลังแห้ง ความชื้น 15% โดยประมาณ

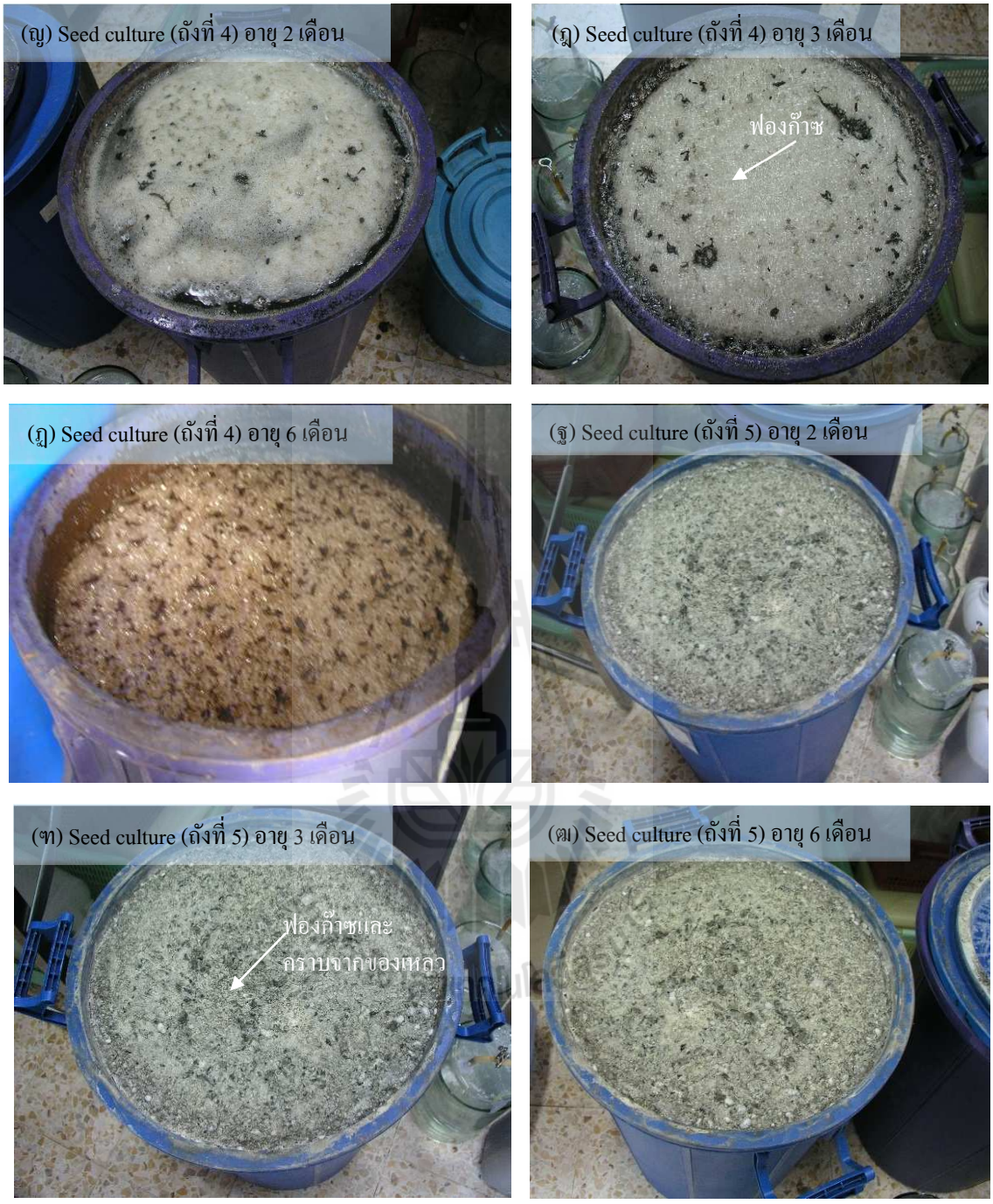
(ค) กากมันสำปะหลังแห้งตีป่นให้เป็นผง พร้อมใช้ในกระบวนการหมักเพื่อผลิตมีเทน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุร

**รูปที่ 3.4** ลักษณะของกากมันสำปะหลังสด (ก) และกากมันสำปะหลังแห้ง (ข และ ค) ที่เตรียมเพื่อให้มีความคงที่ของปริมาณส่วนประกอบของสารอาหารสำหรับการหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน

**รูปที่ 3.5** ลักษณะของเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ที่กระตุ้นให้คุ้นเคยกับการย่อยสลายแป้งจากหัวมันสำปะหลังดิบในถังขนาดบรรจุ 100 ลิตร จำนวน 6 ถัง (ชุดการทดลอง) ที่เติมสารอาหาร (กากน้ำตาลและแป้งจากหัวมันสำปะหลัง) ในสัดส่วนและตามช่วงเวลาแตกต่างกัน เชื้อเริ่มต้นที่ว่องไว (active) ต่อการหมักให้เกิดก๊าซชีวภาพมีลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าของเหลว

**รูปที่ 3.5** (ต่อ) ลักษณะของเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ที่กระตุ้นให้คุ้นเคยกับการย่อยสลายแป้งจากหัวมันสำปะหลังดิบในถังขนาดบรรจุ 100 ลิตร จำนวน 6 ถัง (ชุดการทดลอง) ที่เติมสารอาหาร (กากน้ำตาลและแป้งจากหัวมันสำปะหลัง) ในสัดส่วนและตามช่วงเวลาแตกต่างกัน เชื้อเริ่มต้นที่ว่องไว (active) ต่อการหมักให้เกิดก๊าซชีวภาพมีลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าของเหลว




**รูปที่ 3.5** (ต่อ) ลักษณะของเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ที่กระตุ้นให้คุ้นเคยกับการย่อยสลายแป้งจากหัวมันสำปะหลังดิบในถังขนาดบรรจุ 100 ลิตร จำนวน 6 ถัง (ชุดการทดลอง) ที่เติมสารอาหาร (กากน้ำตาลและแป้งจากหัวมันสำปะหลัง) ในสัดส่วนและตามช่วงเวลาแตกต่างกัน เชื้อเริ่มต้นที่ว่องไว (active) ต่อการหมักให้เกิดก๊าซชีวภาพมีลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าของเหลว

**รูปที่ 3.5** (ต่อ) ลักษณะของเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ที่กระตุ้นให้คุ้นเคยกับการย่อยสลายแป้งจากหัวมันสำปะหลังดิบในถังขนาดบรรจุ 100 ลิตร จำนวน 6 ถัง (ชุดการทดลอง) ที่เติมสารอาหาร (กากน้ำตาลและแป้งจากหัวมันสำปะหลัง) ในสัดส่วนและตามช่วงเวลาแตกต่างกัน เชื้อเริ่มต้นที่ว่องไว (active) ต่อการหมักให้เกิดก๊าซชีวภาพมีลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าของเหลว

**รูปที่ 3.6** การใช้เชื้อเริ่มต้น (Seed culture) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบหัวมันสำปะหลังในถังบรรจุวัสดุหมักปริมาตร 10 ลิตร

### 3.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบด้านธาตุอาหารของหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังจัดเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายและยังคงจัดได้ว่ามีมูลค่าต่ำ เมื่อนำมาวิเคราะห์หาส่วนประกอบกายภาพทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับธาตุอาหารสำหรับจุลินทรีย์ ของวัตถุดิบหัวมันและกากมันสำปะหลัง และเพื่อการเตรียมวัตถุดิบสำหรับการหมักให้ได้ก๊าซมีเทน คือ ปริมาณความชื้น (Moisture content) ด้วยวิธีมาตรฐานตาม AOAC International (2000) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย pH meter (Mettler-Toledo Ltd., England) ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total carbon) และไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) ตามหลักการ Infrared radiation detection และ Thermal conductivity detection ด้วย CNS-2000 Elemental Analyzer (LECO® Corporation, U.S.A.) ปริมาณแป้ง (Starch) ในรูปของน้ำตาลด้วย Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956) ปริมาณ Amylose และ Amylopectin ด้วยวิธีตาม Sene *et al*. (1997) ปริมาณ Alpha-และ Beta-Cellulose ด้วยวิธีตาม Xia0 *et al*. (2001) และ Sun *et al*. (2004) ปริมาณฟอสฟอรัส (Phosphorus) ตาม Vandomolybdate method (AOAC International, 2000) และปริมาณโพแทสเซียม (Potassium) ย่อยด้วยวิธี Wet digestion method และตรวจวิเคราะห์ด้วย Flame photometer (BWB-1, BWB, England) พบว่าหัวมันสำปะหลังดิบทั้งเปลือกอายุในช่วงประมาณ 8 เดือน จำนวน 8 สายพันธุ์ คือ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11), CMR 89 เกษตรศาสตร์ 50 ห้วยบง 60 ระยอง 5 ระยอง 7 ระยอง 9 และ ระยอง 90 ที่ปลูกในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา มีส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักกล่าวคือ มีปริมาณความชื้น 51-68% มีแป้ง 25-33% ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด 32-40% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.06-1.04% ฟอสฟอรัส 0.04-0.11% และโพแทสเซียม 0.28-0.72% (ตารางที่ 3.1) จากนั้นได้เลือกหัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) เนื่องจากมีส่วนประกอบด้านธาตุอาหารในปริมาณที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบของหัวมันสำปะหลังอีก 7 สายพันธุ์ และเป็นพันธุ์ที่หาหัวมันได้ง่ายในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาในช่วงเวลาที่ศึกษา เพื่อทดลองใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพ หัวมันสำปะหลังพันธุ์ดังกล่าวได้นำไปเตรียมเป็นหัวมันแห้งบดหยาบที่วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น 17.34% ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) 82.66% และ Volatile solids 98.54% (ตารางที่ 3.1)

กากมันสำปะหลังที่ใช้ศึกษาได้จากกระบวนการเตรียมแป้งจากหัวมันสำปะหลังของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา 2 โรงงาน ที่เก็บรวบรวมจำนวน 6 ตัวอย่าง เมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมี พบว่ามีปริมาณความชื้นในช่วง 77-83% pH 3.9-5.0 มีแป้ง 24-44% ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด 31-49% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.15-0.29% ฟอสฟอรัส 0.02% และโพแทสเซียม 0.24% (ตารางที่ 3.2)

จากนั้นเลือกกากมันตัวอย่างที่ 1 (ตารางที่ 3.2) เพื่อเตรียมตัวอย่างแห้ง ซึ่งกากมันสำปะหลังแห้งที่เตรียมได้มีความชื้น 15.19% มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) 84.46% และ Volatile solids 97.37% (ตารางที่ 3.3) สำหรับการทดลองผลิตมีเทน

**ตารางที่ 3.1** ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีของหัวมันสำปะหลังอายุโดยเฉลี่ย 8 เดือน จำนวน 8 สายพันธุ์ ที่เก็บรวบรวมจากพื้นที่ปลูกในจังหวัดนครราชสีมา

| **Composition (%)** | **Cassava variety** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **CMR 35-22-196** | **CMR 89** | **Kasetsart 50** | **Huay-bong 60** Lot 1 | **Huay-bong 60** Lot 2 | **Rayong 5** | **Rayong 7** | **Rayong 9** | **Rayong 90** |
| Fresh tuber: | | | | | | | | | |
| Moisture content | 51.95 | 58.52 | 50.87 | 58.23 | 69.13 | 56.42 | 54.09 | 66.51 | 68.05 |
| pH | 6.04 | 6.25 | 6.16 | 6.83 | 6.51 | 6.44 | 6.02 | 6.59 | 6.61 |
| Starch[a] | 25.56 | 26.38 | 25.32 | 33.75 | 32.05 | 28.72 | 27.74 | 26.40 | 28.10 |
| Amylose[b] | 9.16 | 7.33 | 7.69 | 9.06 | ND | ND | 7.27 | 13.44 | ND |
| Amylopectin[b] | 11.81 | 6.26 | 6.65 | 5.59 | ND | ND | 6.48 | 9.58 | ND |
| Alpha-Cellulose[c] | 11.79 | 9.12 | 13.99 | 10.72 | ND | ND | 11.36 | 14.20 | ND |
| Beta-Cellulose[c] | 9.12 | 9.04 | 10.37 | 11.36 | ND | ND | 9.04 | 8.25 | ND |
| Total carbon[d] | 39.62 | 39.50 | 39.41 | 22.64 | 36.67 | 39.93 | 39.68 | 39.88 | 40.72 |
| Total nitrogen[d] | 0.33 | 0.21 | 0.06 | 0.07 | 0.47 | 0.14 | 0.18 | 0.06 | 1.04 |
| Fiber[e] | 8.44 | 5.14 | 9.85 | 8.88 | ND | ND | 5.50 | 8.54 | ND |
| Ash[f] | 1.46 | 2.59 | 1.08 | 2.02 | 1.80 | ND | 2.11 | 1.25 | 2.06 |
| Phosphorus[g] | 0.04 | 0.10 | 0.03 | 0.05 | 0.11 | 0.04 | 0.04 | 0.10 | 0.02 |
| Potassium[h] | 0.40 | 0.72 | 0.50 | 0.29 | 0.44 | 0.50 | 0.50 | 0.64 | 0.28 |
| Dry tuber: | | | | | | | | | |
| Moisture content | 17.34 | 17.78 | 18.08 | 18.34 | 18.00 | 14.18 | 17.55 | 17.61 | 18.80 |
| Total solids[i] | 82.66 | 82.22 | 81.92 | 81.66 | 82.00 | 85.82 | 82.45 | 82.39 | 81.10 |
| Volatile solids[i] | 98.54 | 97.41 | 98.92 | 97.98 | 97.50 | 98.65 | 97.89 | 98.75 | 97.20 |

[a] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[b] Amylose และ Amylopectin (Sene *et al*., 1997)

[c] Alpha-Cellulose และ Beta-Cellulose (Xiao *et al*., 2001; Sun *et al*., 2004)

[d] CNS-2000 Elemental Analyzer (LECO® Corporation, U.S.A.)

[e] Fiber (AOAC, 1990)

[f] Ash (AOAC International, 2000)

[g] Vandomolybdate method (Barton, 1948)

[h] Wet digestion method ด้วยเครื่อง Flamephotometer (BWB-1, England)

[i] Total solids (AOAC International, 2000; Zhang and Zhang, 1999) และ Volatile solids (AOAC, 1990)

ND, Not determined

**ตารางที่ 3.2** ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีของกากมันสำปะหลังจำนวน 6 ตัวอย่าง ที่เก็บรวบรวมจากต่างแหล่งผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา

| Composition (%) | Cassava pulp from different plants in Nakhon Ratchasima Province (sample no.) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Moisture content | 83.03 | 78.64 | 79.34 | 80.35 | 77.02 | 79.58 |
| pH | 3.90 | 4.22 | 4.76 | 5.05 | 4.87 | 4.47 |
| Starch[a] | 24.40 | 28.38 | 31.98 | 27.20 | 34.09 | 44.37 |
| Amylose[b] | 7.38 | 11.64 | 14.08 | 12.89 | 11.83 | 9.22 |
| Amylopectin[b] | 6.43 | 10.52 | 13.02 | 12.89 | 12.54 | 9.03 |
| Alpha-Cellulose[c] | 10.41 | 17.85 | 22.46 | 13.46 | 13.19 | 11.98 |
| Beta-Cellulose[c] | 7.68 | 17.84 | 19.20 | 13.46 | 13.73 | 12.11 |
| Total carbon[d] | 31.58 | 37.77 | 39.02 | 35.69 | 41.86 | 49.98 |
| Total nitrogen[d] | 0.23 | 0.29 | 0.29 | 0.22 | 0.29 | 0.15 |
| Fiber[e] | 7.15 | 10.57 | 11.51 | 11.46 | 11.30 | 10.34 |
| Ash[f] | 2.63 | 1.41 | 1.51 | 1.60 | 1.72 | 2.48 |
| Phosphorus[g] | 0.02 | ND | ND | ND | ND | ND |
| Potassium[h] | 0.24 | ND | ND | ND | ND | ND |

[a] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[b] Amylose และ Amylopectin (Sene *et al*., 1997)

[c] Alpha-Cellulose และ Beta-Cellulose (Xiao *et al*., 2001; Sun *et al*., 2004)

[d] CNS-2000 Elemental Analyzer (LECO® Corporation, U.S.A.)

[e] Fiber (AOAC, 1990)

[f] Ash (AOAC International, 2000)

[g] Vandomolybdate method (Barton, 1948)

[h] Wet digestion method ด้วยเครื่อง Flamephotometer (BWB-1, England)

ND, Not determined

**ตารางที่ 3.3** กากมันสำปะหลังแห้ง (ตัวอย่างที่ 1 ตามตารางที่ 3.2) ที่ใช้ทดลองหมักเพื่อผลิตมีเทน

| Composition (%) | Dried cassava pulp prepared for methane production |
|---|---|
| Moisture content | 15.19 |
| Total solids[a] | 84.46 |
| Volatile solids[a] | 97.37 |

[a] Total solids และ Volatile solids ตาม AOAC (1990) และ Zhang and Zhang (1999)

### 3.4 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทดลองผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพและเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

#### 3.4.1 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทดลองผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพ

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ในการหมักเพื่อผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพ จากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง มีขนาดบรรจุที่ใช้ปริมาตรหมัก 5-50 ลิตร กรณีถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ปริมาตรหมักน้อยกว่า 50 ลิตร มี 3 ขนาด คือ 5, 10 (ทดแทนถังขนาด 5 ลิตร ซึ่งชำรุดหลังการใช้งานต่อเนื่องกันและไม่สามารถจัดหาใหม่ได้ในช่วงการดำเนินงานของโครงการ) และ 20 ลิตร เป็นถังพลาสติกแข็งทรงสี่เหลี่ยม ความกว้าง 10, 13 และ 18 เซนติเมตร ความยาว 20, 26 และ 30 เซนติเมตร และความสูง 25, 30 และ 40 เซนติเมตร ขนาดบรรจุ 7.50, 10.14 และ 21.60 ลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.7-3.9) มีสายยางซิลิโคนเชื่อมต่อถังหมักกับอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาตรของก๊าซที่ผลิตได้ (Gas counter) ด้วยหลักการแทนที่น้ำ โดยน้ำที่บรรจุใน Gas counter เป็นน้ำกลั่นที่ปรับค่า pH เท่ากับ 2 เพื่อหลีกเลี่ยงการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

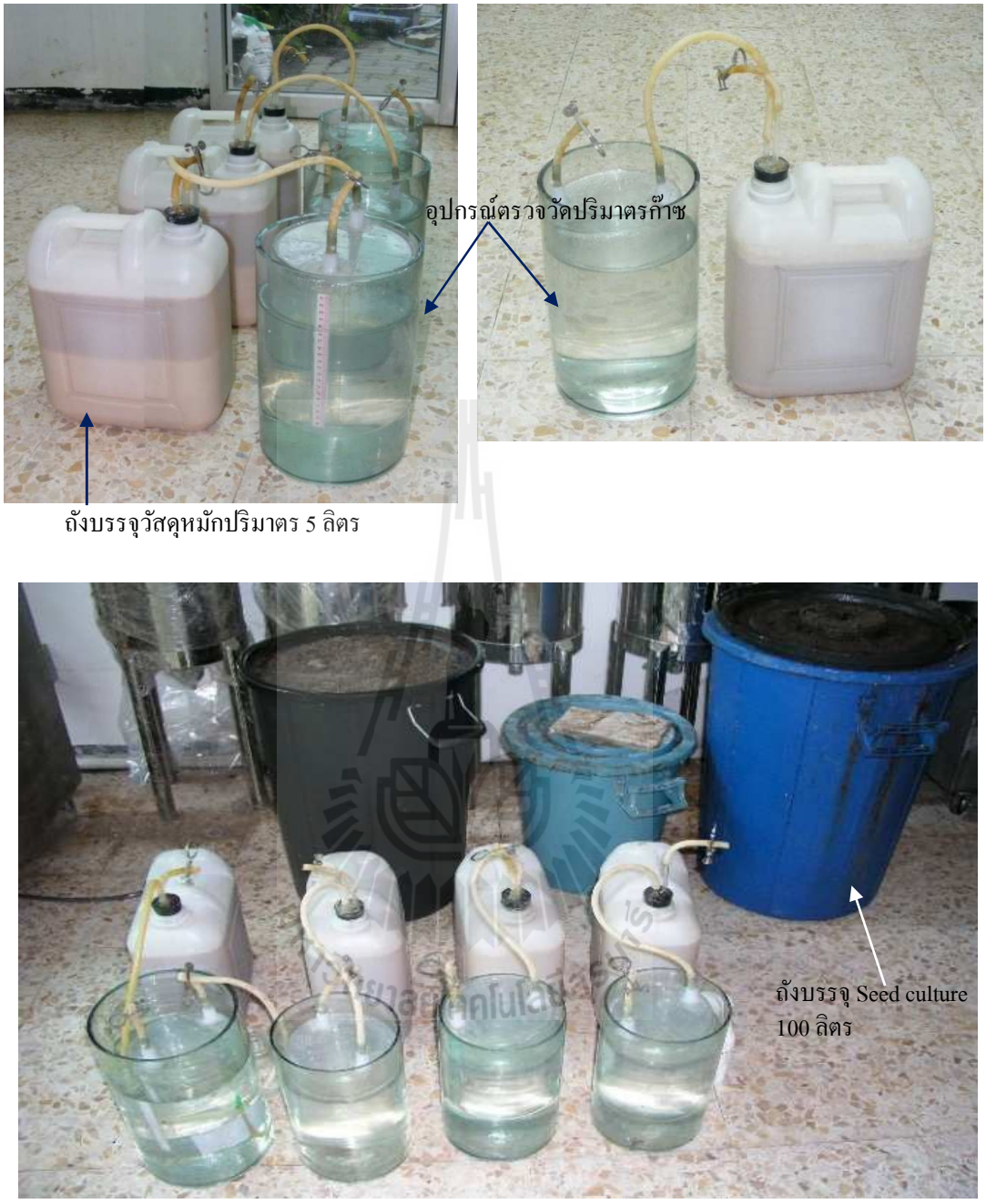
ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ในการหมักปริมาตรหมัก 50 ลิตร เป็นถังสแตนเลสทรงกระบอกจากการจัดสร้างในห้องปฏิบัติการเพื่อการวิจัยและการเรียนการสอน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร มีขนาดบรรจุ 56.50 ลิตร (ตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.10)

**ตารางที่ 3.4** คุณลักษณะทางกายภาพของถังปฏิกรณ์/ ภาชนะบรรจุสำหรับการผลิตมีเทนที่มีปริมาตรบรรจุ (Working volume) 5, 10, 20 และ 50 ลิตร

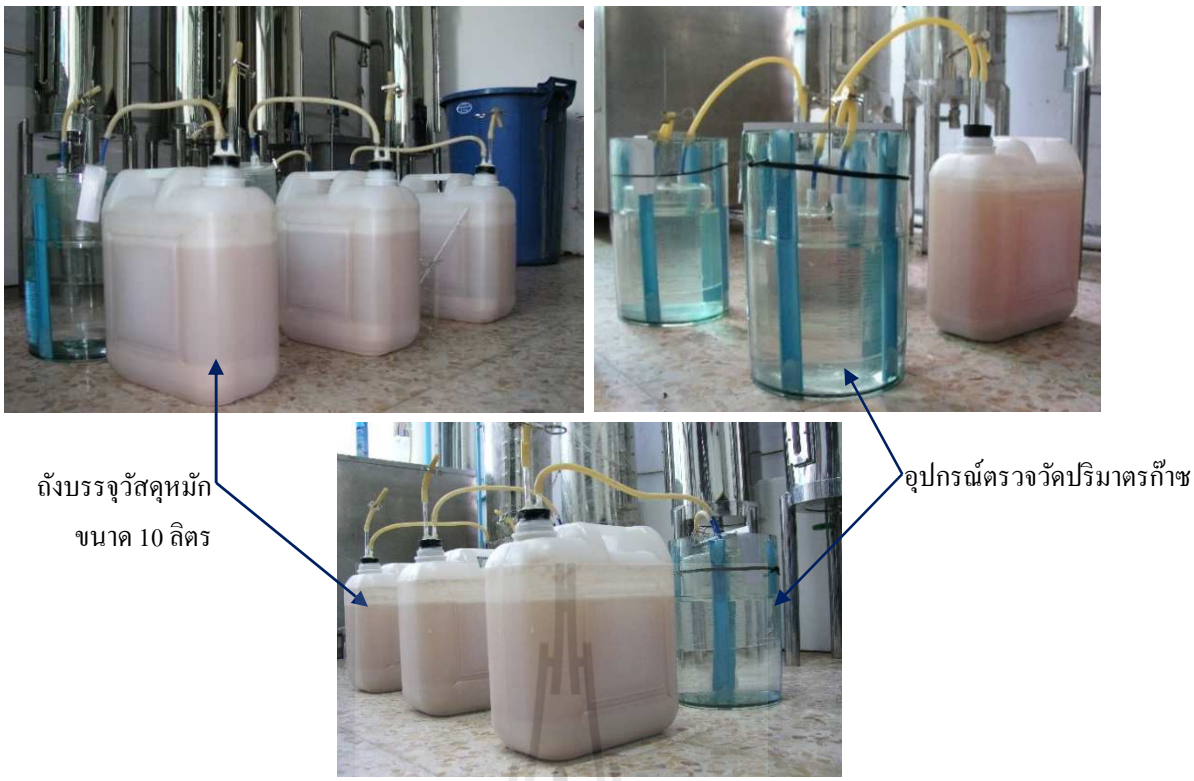
| **Parameter** | **Digester size for working volume (L)** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Digester height (cm) | 25.00 | 30.00 | 40.00 | 80.00 |
| Digester length (cm) | 20.00 | 26.00 | 30.00 | - |
| Digester width (cm) | 10.00 | 13.00 | 18.00 | 30.00 (Diameter) |
| Digester volume (L) | 7.50 | 10.14 | 21.60 | 56.50 |
| Filled volume (L) | 5.00 | 10.00 | 20.00 | 50.00 |

#### 3.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ

เครื่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เป็นอุปกรณ์ที่ทางโครงการวิจัยนี้จัดสร้างขึ้นใช้เอง มีทั้งลักษณะเป็นโหลแก้วทรงกระบอก (เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 11 เซนติเมตร และความสูง 31 เซนติเมตร) และตู้กระจกทรงสี่เหลี่ยม (กว้าง 24 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร) มีกล่องซิลิโคนทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์อยู่ภายในตู้เพื่อตรวจจับก๊าซจากท่อที่ต่อจากถังปฏิกรณ์โดยการแทนที่น้ำ การวัด 1 รอบ เท่ากับปริมาตร 60 มิลลิลิตร (รูปที่ 3.11)




**รูปที่ 3.7** ลักษณะของถังบรรจุวัสดุหมักก๊าซชีวภาพปริมาตร 5 ลิตร อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซโดยการแทนที่น้ำ และถังบรรจุเชื้อเริ่มต้น (Seed culture)




**รูปที่ 3.8** ลักษณะของถังบรรจุวัสดุหมักปริมาตร 10 ลิตร ที่เตรียมเพื่อใช้ทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง และอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซโดยการแทนที่น้ำ

รูปที่ **3.9** ลักษณะของถังบรรจุวัสดุหมักปริมาตร 20 ลิตร ที่เตรียมเพื่อใช้ทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง และอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซโดยการแทนที่น้ำ

**รูปที่ 3.10** ถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับปริมาตรหมัก 50 ลิตร ที่ต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาตรก๊าซ และถังบรรจุ Seed culture

**รูปที่ 3.11** ถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ และเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดระหว่างกระบวนการหมัก (Gas Analyzer, Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

### 3.5 การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง

#### 3.5.1 การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบ

ทดลองผลิตมีเทนให้ได้เป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ โดยใช้หัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ที่ปลูกโดยทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา และหาได้ง่ายในช่วงดำเนินการโครงการนี้ เตรียมหัวมันเป็นชิ้นในลักษณะแห้ง วิเคราะห์ได้ความชื้นโดยเฉลี่ย 17.34% และ Total solids 82.66% เป็นวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ชีวภาพปริมาตรวัสดุหมัก 5 ลิตร ที่มีค่า Total solids 1.0% (จากผลการวิจัยเบื้องต้น) มีปริมาณแป้งที่วิเคราะห์ได้โดยเฉลี่ยราว 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยระบบ Single-stage digester ที่อุณหภูมิห้อง (23-27 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) และใช้เชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ชุดการทดลองที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค) ปริมาณ 10% (ปริมาตรต่อปริมาตร) พบว่ากระบวนการหมักสิ้นสุดที่ 21 วัน และได้ก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดคือ 19.24 ลิตร เทียบเท่าผลผลิตก๊าซชีวภาพ 385 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีเทนเข้มข้นสูงสุดโดยเฉลี่ย (62%) ในวันที่ 16 ของการหมัก (ตารางผนวกที่ 1)

เมื่อเริ่มกระบวนการหมัก Acid forming-bacteria เจริญ มีการสร้างกรด ค่า pH ของวัสดุหมัก (Slurry) ต่ำกว่า Neutral pH (pH 7.0) มีผลลดการเจริญของ Methanogenic bacteria และ Methanogenesis การเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตสามารถช่วยเพิ่ม Alkalinity ของระบบหมัก (Cuzin *et al*., 1992) ในการศึกษานี้ได้เติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0.25% จำนวน 4 ครั้ง ระหว่างการหมักในสัปดาห์แรก จากนั้นค่า pH ของวัสดุหมักค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง (ตารางผนวกที่ 1)

การสะสม Volatile fatty acids (Acetic, Propionic และ Butyric acids) ในกระบวนการหมักหัวมันสำปะหลังในระดับที่ตรวจพบได้ พบว่ามีความเข้มข้นของ Propionic acid และ Butyric acid มีมากกว่า Acetic acid ซึ่ง Acetic acid สามารถนำไปใช้โดย Methanogenic bacteria ได้อย่างรวดเร็ว (ตารางผนวกที่ 1)

การทดลองผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบครั้งนี้ไม่มีการเติมแหล่งไนโตรเจนเพิ่มจากที่มีในหัวมันสำปะหลัง (ตารางที่ 3.1) จึงได้ศึกษาเพิ่มการผลิตมีเทนโดยเติมแหล่งไนโตรเจนด้วยชนิดและปริมาณที่เหมาะสม (ข้อ 3.6)

#### 3.5.2 การทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง

ทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลังด้วยการประมาณวัสดุหมักเริ่มต้นจากผลการทดลองหมักที่ได้จากการใช้หัวมันสำปะหลังดิบ ที่พบว่าการใช้หัวมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 17.34%) ในปริมาณ Total solids 1.0% (มีปริมาณแป้งที่ตรวจวิเคราะห์ได้โดยเฉลี่ยราว 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ให้ผลผลิตมีเทนที่ความเข้มข้นสูงเพียงพอจะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จึงทดลองผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งในปริมาณและส่วนผสมเดียวกันกับหัวมันสำปะหลัง ด้วยระบบ Single-stage digester ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร (ทดแทนถังหมักปริมาตร 5 ลิตร ที่ชำรุดและไม่สามารถหาทดแทนได้ในช่วงการศึกษาของโครงการนี้) ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้)

และใช้เชื้อเริ่มต้นจากที่พัฒนาได้ (ข้อ 3.2) ปริมาณ 10% โดยปริมาตร ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณน้อย โดยได้ปริมาณก๊าซทั้งหมด 16.85 ลิตร จาก Total solids 1.0% และหมักจนสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งใช้เวลา 21 วัน เทียบเท่าผลผลิตก๊าซชีวภาพ 168.50 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed และความเข้มข้นของมีเทนสูงสุด 50% ในวันที่ 13-20 ของการหมัก (ตารางผนวกที่ 6) จัดได้ว่าเป็นความเข้มข้นที่ต่ำเมื่อเทียบกับการใช้หัวมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ (ตารางผนวกที่ 1 และ 5) แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซที่ดำเนินการในขั้นตอนต่อไป (ข้อ 3.6)

## 3.6 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง

ศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง ด้านสารอาหารที่เป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบและที่จำเป็นต้องเติมลงไปในระบบหมัก จุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้สารอาหารเหล่านี้ในการเจริญและสร้างผลผลิตก๊าซเป้าหมาย โดยคำนึงถึงสัดส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N ratio) ความเป็นด่าง (Alkalinity) และความเป็นกรด-ด่าง (pH) แบคทีเรียที่สร้างมีเทนส่วนใหญ่มี pH ที่เหมาะสมต่อ Methanogenesis ในช่วง 6.5-7.6 และทดลองผลิตที่อุณหภูมิห้องโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส เพื่อลดความต้องการระบบควบคุมอุณหภูมิทำให้สามารถผลิตมีเทนได้ตั้งแต่ระดับครัวเรือนถึงอุตสาหกรรม และยังเป็นช่วงอุณหภูมิที่จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพยังคงเจริญได้ดี (Makie and Bryant, 1995; Deublein and Steinhauser, 2008)

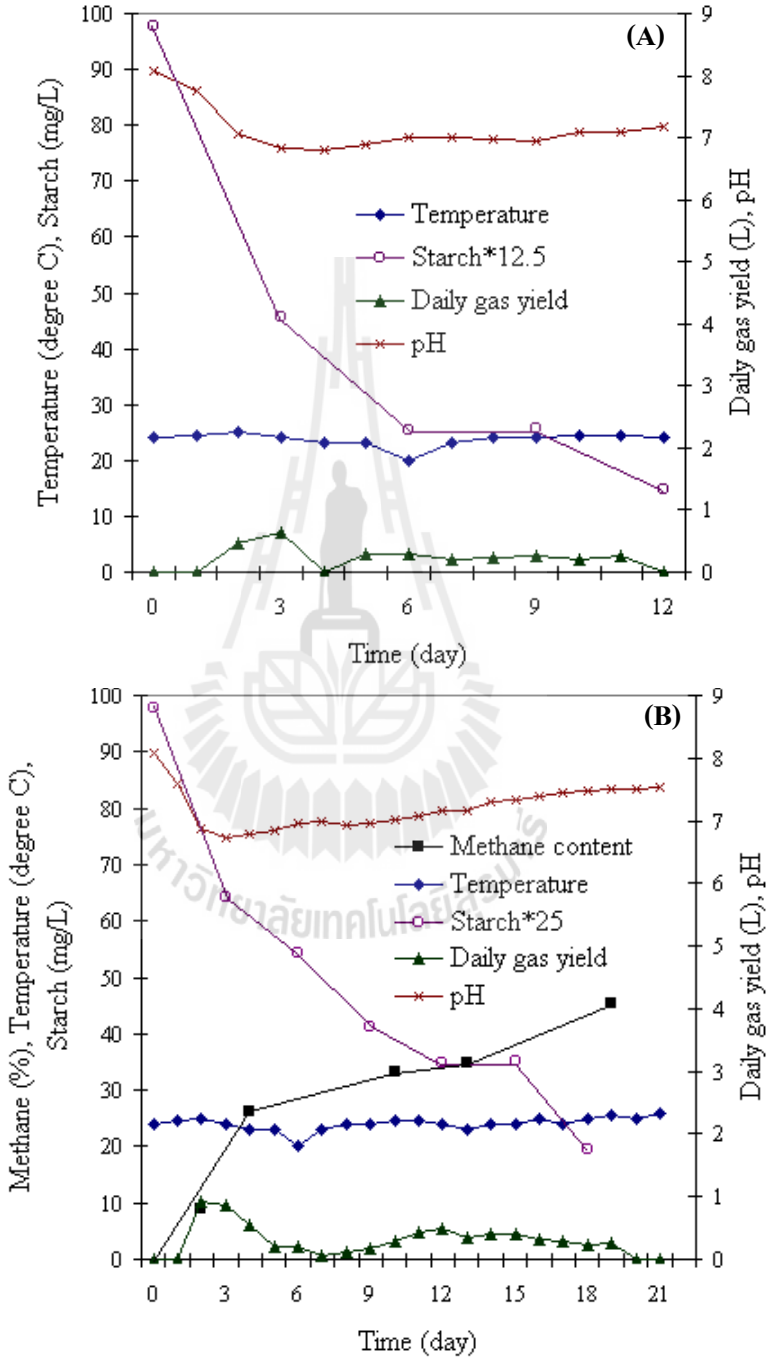
### 3.6.1 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลัง

#### 3.6.1.1 ปริมาณหัวมันสำปะหลังที่เหมาะสม

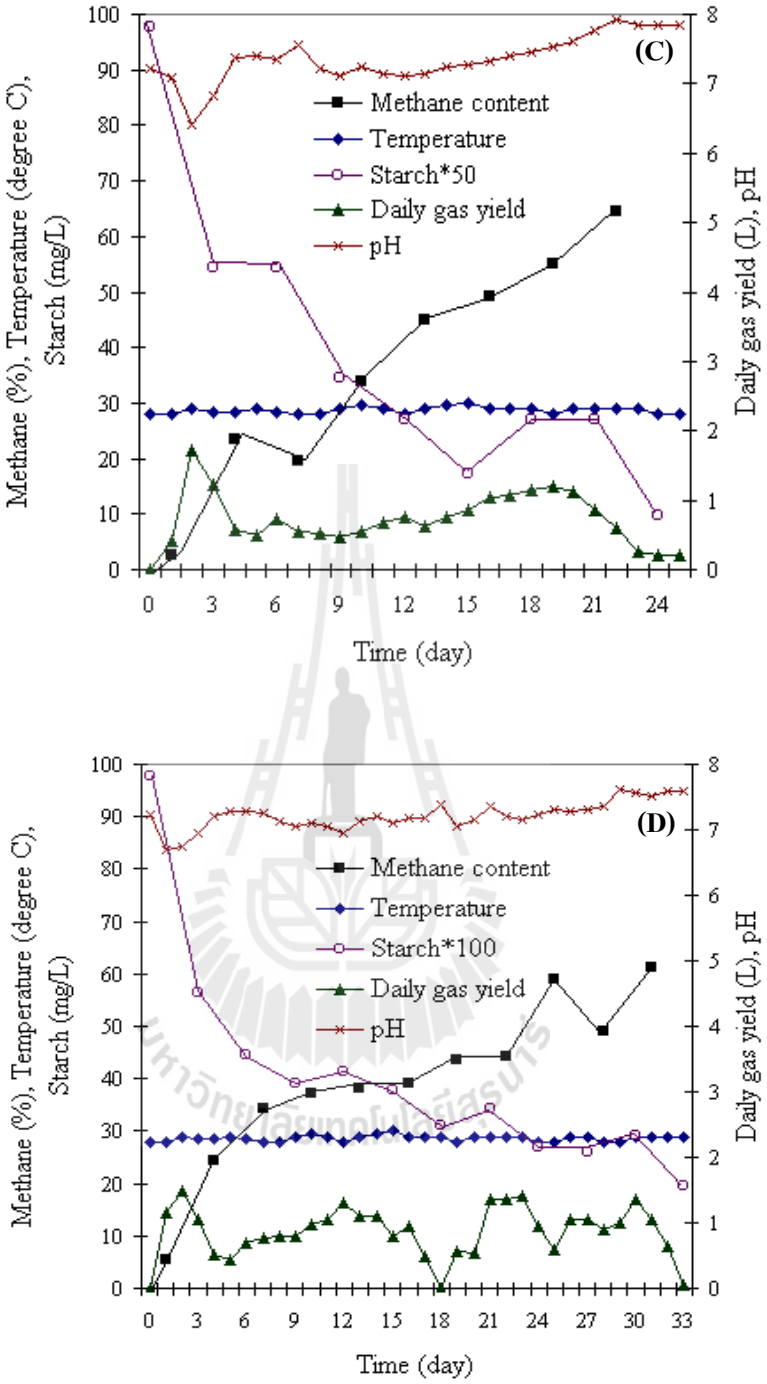
ใช้หัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ชุดที่นำมาทดลองผลิตมีเทนในโครงการนี้มีค่าเฉลี่ยของคาร์บอนและไนโตรเจนต่างกันราว 120 เท่า (ตารางที่ 3.1) สัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักก๊าซชีวภาพตามที่มีรายงานควรประมาณ 20-30:1 จึงสามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด (Polprasert, 1989; Viswanath *et al*., 1992) ในการศึกษาครั้งนี้จึงทดลองหมักที่ปริมาตร 5 ลิตร ใช้วัตถุดิบหัวมันสำปะหลังดิบเตรียมในรูปมันแห้ง (ความชื้น 17.34%) ที่มีค่า Total solids แตกต่างกัน คือ 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00 และ 16.00% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และทดลองเติมยูเรีย (มีไนโตรเจน 46.7%) เป็นแหล่งไนโตรเจนปริมาณ 0.04% (จากผลการศึกษาเบื้องต้นของผู้วิจัย) ลงในวัสดุหมัก พบว่าปริมาณ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดปริมาณ 27 ลิตร เทียบเท่าผลผลิตก๊าซชีวภาพ 540 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ผลผลิตก๊าซ 1.98 ลิตรต่อวัน ที่มีมีเทนเข้มข้นสูงสุดที่ตรวจพบ 66% ในวันที่ 9 ของการหมัก และการหมักสิ้นสุดภายใน 17 วัน (รูปที่ 3.12 และ 3.13 และตารางผนวกที่ 2)

จากนั้นได้ทดลองเพิ่มปริมาตรหมัก ผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพเป็นปริมาตรหมัก 20 ลิตร ตามขนาดถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่เหมาะสม (ตารางที่ 3.4) ด้วย Total solids 1% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่าได้ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเพิ่มเป็น 93.68 ลิตร เทียบเท่าผลผลิตก๊าซ 468.40 ลิตรต่อ

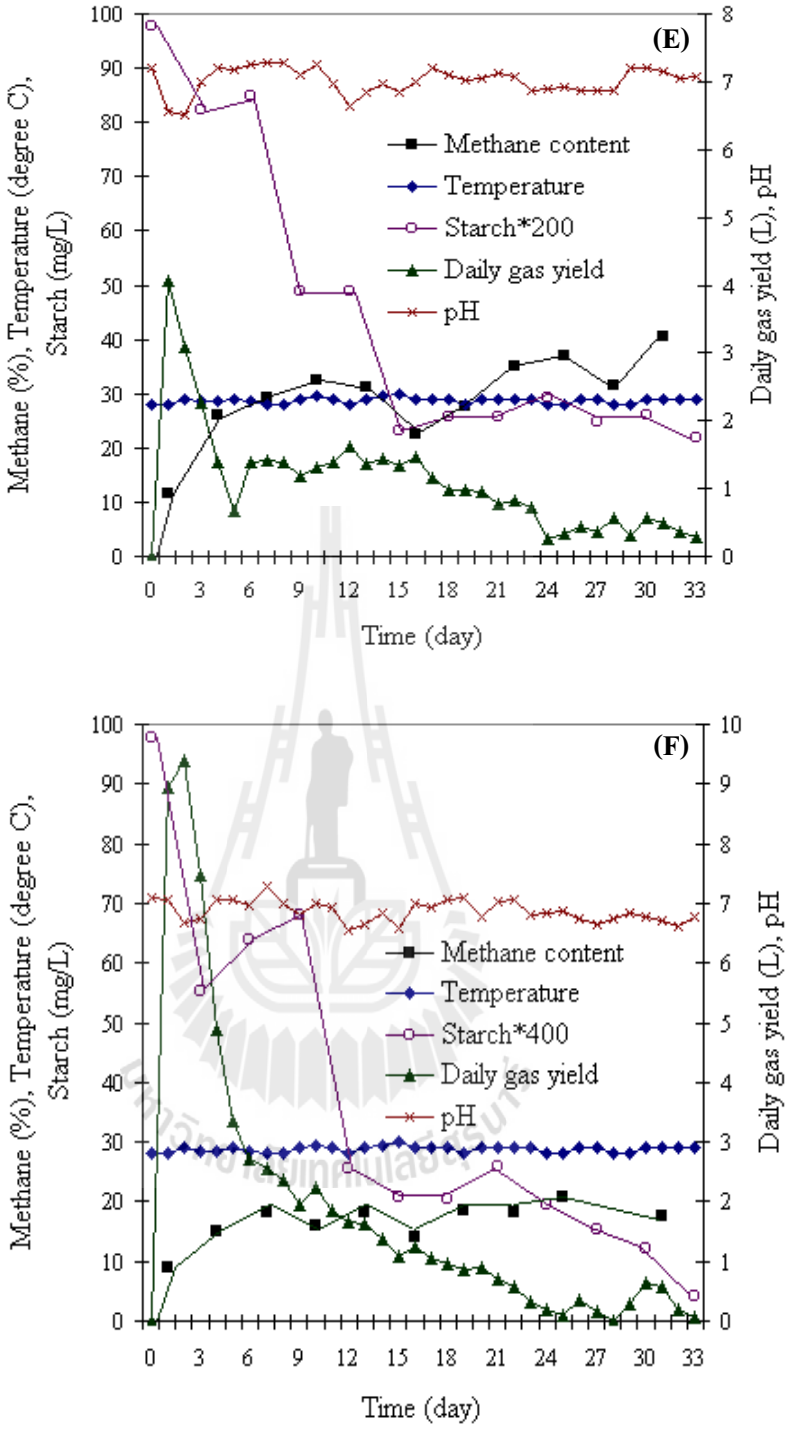
กิโลกรัม Total solids fed ความเข้มข้นของมีเทนสูงสุดมากกว่า 60% (ได้ความเข้มข้น 62.50%) ในวันที่ 14 ของการหมัก และมีความเข้มข้นสูงสุด 76% (ปริมาตรก๊าซชีวภาพ 1.00-2.40 ลิตรต่อวัน) ในช่วงวันที่ 23-28 ของการหมัก (ตารางผนวกที่ 3) นำผลที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ไปทดลองหาชนิดและปริมาณแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจาหัวมันสำปะหลังดิบ



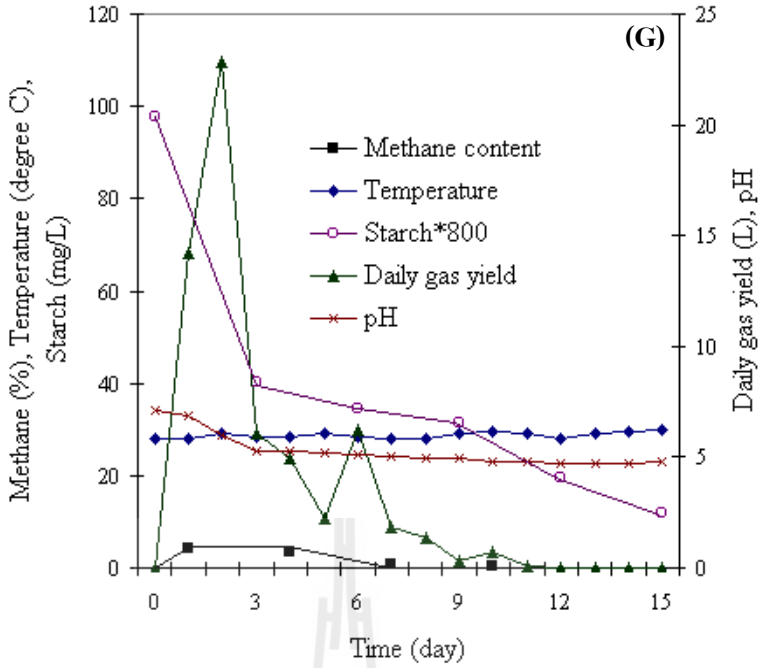

**รูปที่ 3.12** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) แตกต่างกันดังนี้ 0.25 (A), 0.5 (B), 1.0 (C), 2.0 (D), 4.0 (E), 8.0 (F) และ 16.0 (G) ใน Single-stage digester ปริมาตรหมัก 5 ลิตร



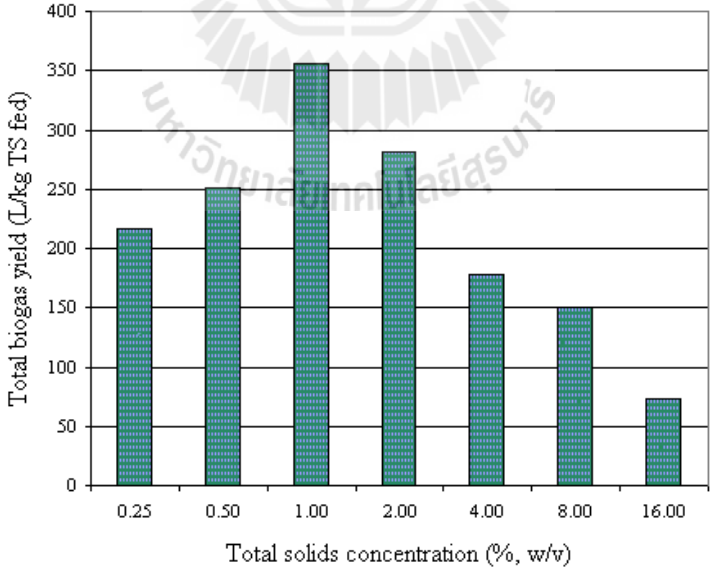

**รูปที่ 3.12** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) แตกต่างกันดังนี้ 0.25 (A), 0.5 (B), 1.0 (C), 2.0 (D), 4.0 (E), 8.0 (F) และ 16.0 (G) ใน Single-stage digester ปริมาตรหมัก 5 ลิตร




**รูปที่ 3.12** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) แตกต่างกันดังนี้ 0.25 (A), 0.5 (B), 1.0 (C), 2.0 (D), 4.0 (E), 8.0 (F) และ 16.0 (G) ใน Single-stage digester ปริมาตรหมัก 5 ลิตร




**รูปที่ 3.12** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) แตกต่างกันดังนี้ 0.25 (A), 0.5 (B), 1.0 (C), 2.0 (D), 4.0 (E), 8.0 (F) และ 16.0 (G) ใน Single-stage digester ปริมาตรหมัก 5 ลิตร




**รูปที่ 3.13** ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) เมื่อใช้ Total solids ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 0.25-16.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร

**3.6.1.2 ชนิดและปริมาณของแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลัง**

หัวมันสำปะหลังแห้งพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าสัดส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนปริมาณ 120:1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงมากและไม่เหมาะสมนักต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพดังกล่าวข้างต้น ค่าสัดส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนตามที่มีรายงานว่าเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ C:N เท่ากับ 20-30:1 (Sanders and Bloodgood, 1965; Polprasert, 1989) จึงเลือกใช้หัวมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 17.34%) ในปริมาณ Total solids ปริมาณ 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเลือกใช้แหล่งไนโตรเจนต่างกันคือ ยูเรีย (มีไนโตรเจน 46.7%) แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$ มีไนโตรเจน 21.0%) และ โพแทสเซียมไนเตรท ($KNO_3$ มีไนโตรเจน 13.9%) ในปริมาณที่คำนวณให้ได้สัดส่วนของ C:N ในช่วง 20-30:1 เพื่อผลิตมีเทนด้วยปริมาตรหมัก 20 ลิตร ได้ผลดังนี้

ก. ยูเรีย

ตามผลการศึกษาข้อ 3.6.1.1 เมื่อเติมยูเรียปริมาณ 0.40 กรัมต่อลิตร (0.04%) ให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพ 486.40 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นทั้งหมด 93.68 ลิตร ที่ใช้เวลา 35 วัน จึงสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุด 76% โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 23-28 วัน (ตารางผนวกที่ 3)

ข. แอมโมเนียมซัลเฟต

เมื่อเติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.88 กรัมต่อลิตร (0.088%) ให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพ 350.90 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 70.18 ลิตร ที่ใช้เวลา 35 วัน จึงสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซ และมีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด 77% โดยปริมาตร ในวันที่ 28-34 ของการหมัก (ตารางผนวกที่ 4)

ค. โพแทสเซียมไนเตรท

กรณีเติมโพแทสเซียมไนเตรทปริมาณ 1.42 กรัมต่อลิตร (0.142%) ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 519.55 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 103.91 ลิตร จากที่ใช้เวลา 35 วัน จึงสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และมีปริมาณมีเทนสูง 70-80% โดยปริมาตร เมื่อหมักได้ 16-28 วัน (ตารางผนวกที่ 5)

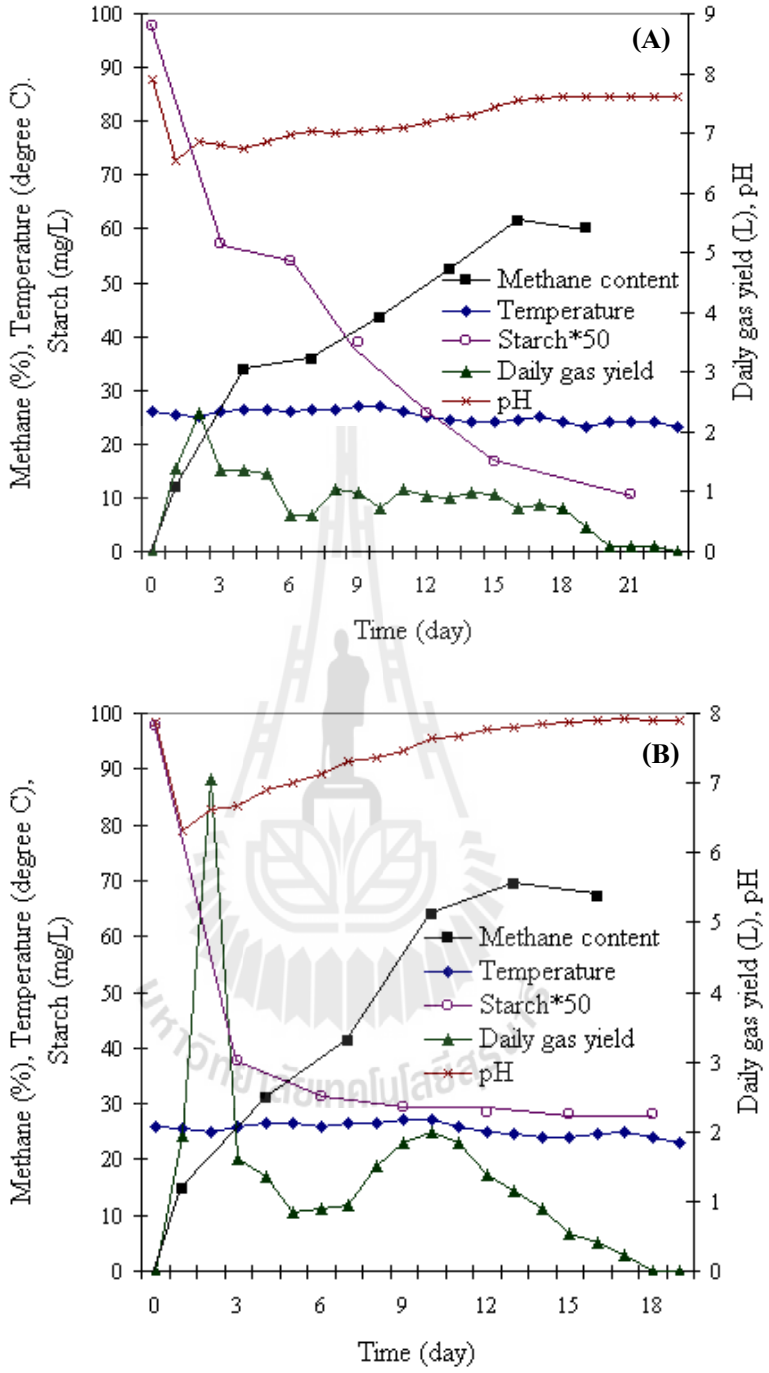
ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุหมักเป็นกลางถึงด่างเมื่อเติมแหล่งไนโตรเจนต่างกัน คือ ยูเรีย แอมโมเนียมซัลเฟต และโพแทสเซียมไนเตรท อยู่ในช่วง 6.51-8.51, 6.21-8.46 และ 6.42-8.56 ตามลำดับ ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 4 วันแรกของการหมัก จึงมีการปรับ pH ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต 0.25% เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวข้างต้น และ pH ค่อยเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของการหมัก ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ 3-5)

จากการศึกษาชนิดของแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ ปริมาณมีเทน (ตารางที่ 3.5) และปริมาณและราคาของสารแหล่งไนโตรเจน แม้โพแทสเซียมไนเตรทให้ผลการผลิตมีเทนและก๊าซชีวภาพในภาพรวมดีกว่าการใช้ยูเรีย (ให้ผลดีกว่าแอมโมเนียมซัลเฟต) และแอมโมเนียมซัลเฟต (ให้ผลด้อยที่สุด) ก็ตาม แต่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมากกว่าอีกสองแหล่งไนโตรเจนข้างต้น เนื่องจากโพแทสเซียมไนเตรทมีธาตุไนโตรเจนเพียง 13.9% ในขณะที่ยูเรียและแอมโมเนียมซัลเฟตมีธาตุไนโตรเจน 46.7 และ 21.0% ตามลำดับ อีกทั้งมีราคาสูง (ราคาต่อ 500 กรัม เท่ากับ 450, 300 และ 290 บาท สำหรับโพแทสเซียมไนเตรท แอมโมเนียมซัลเฟต และยูเรีย ตามลำดับ ที่จัดซื้อมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้) รวมถึงยูเรียยังสามารถหาซื้อได้ในระดับปุ๋ยยูเรีย ซึ่งน้ำหนักกระสอบ 50 กิโลกรัม มีราคาณ ปัจจุบันราว 650 บาท จึงเลือกใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยใช้หัวมันสำปะหลังแห้งที่ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และทดลองเติมยูเรียในปริมาณ 0.02-0.20% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ผลการศึกษาพบว่าการเติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ลงในหัวมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 17.34%) ที่ Total solids 1.0% ยังคงให้ผลการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพดีที่สุด (รูปที่ 3.14-3.15)

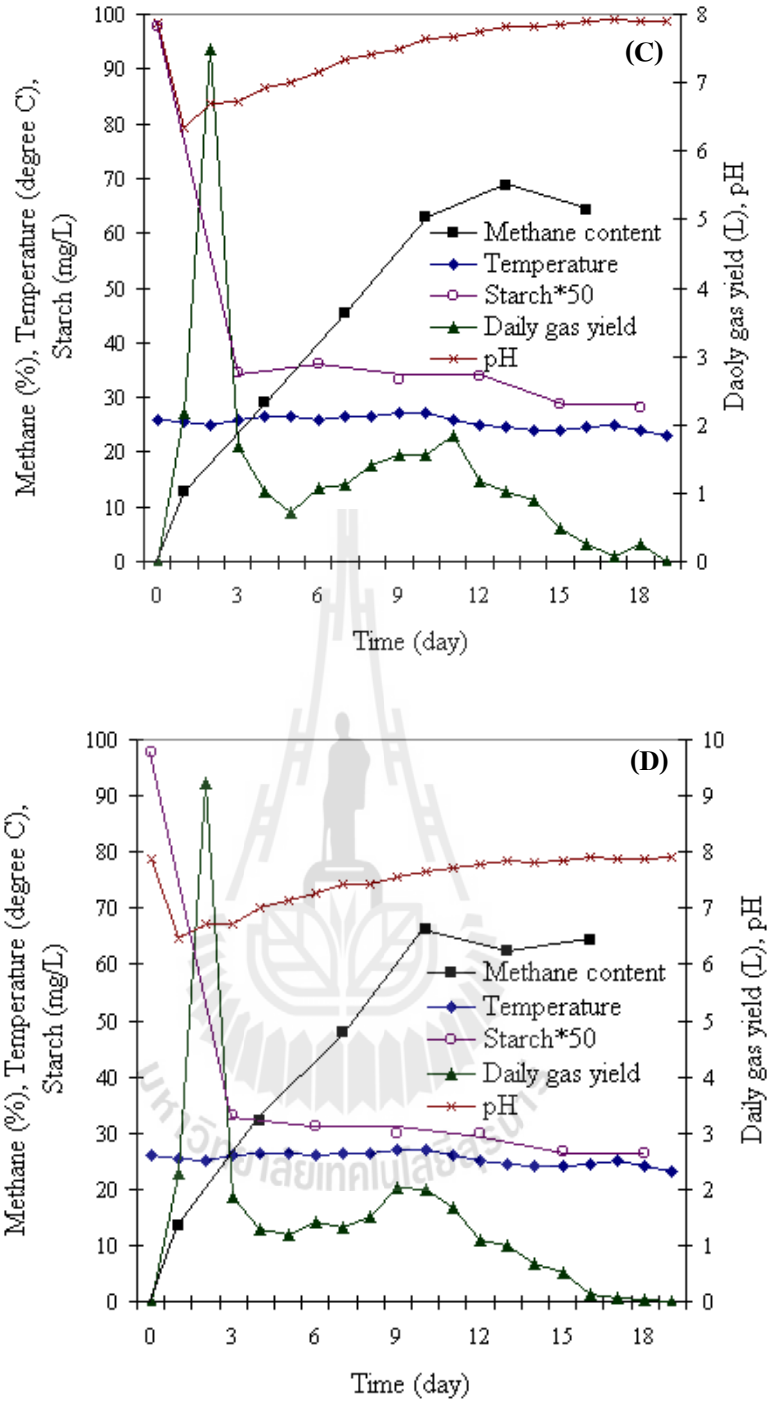
**ตารางที่ 3.5** การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% เติมแหล่งไนโตรเจนต่างชนิดด้วยความเข้มข้นเทียบเท่ากันโดยประเมินจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบ (ตารางผนวกที่ 3-5 และ 17)

| Nitrogen source/ Concentration (%) | Digestion volume (L) | Retention time (Day) | Maximum methane (%, v/v)/ Duration | Total gas yield (L) | Total gas yield (L/kg TS fed) | Starch concentration (mg/L) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 0 day | End of fermentation |
| Urea / 0.04 | 20 | 35 | 77.3/ Day 27 | 93.68 | 468.40 | 4,663.45 | 210.72 |
| Urea / 0.04 | 50 | 38 | 75.9/ Day 21 | 313.02 | 626.04 | 4,124.56 | 300.00 |
| $(NH_4)_2SO_4$ / 0.088 | 20 | 35 | 78.0/ Day 35 | 70.18 | 350.90 | 4,557.30 | 198.06 |
| $KNO_3$ / 0.142 | 20 | 35 | 80.4/ Day 31 | 103.91 | 519.55 | 5,292.15 | 217.66 |

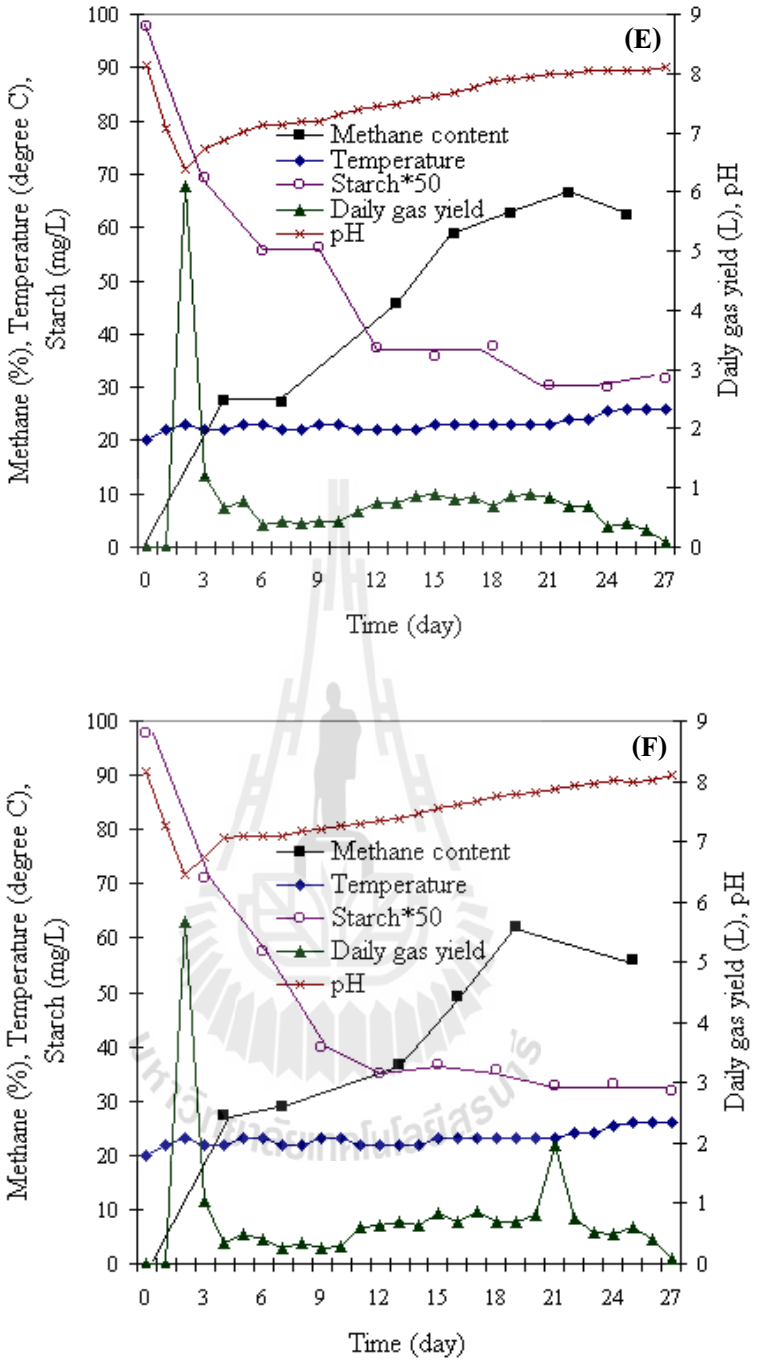
TS, Total solids



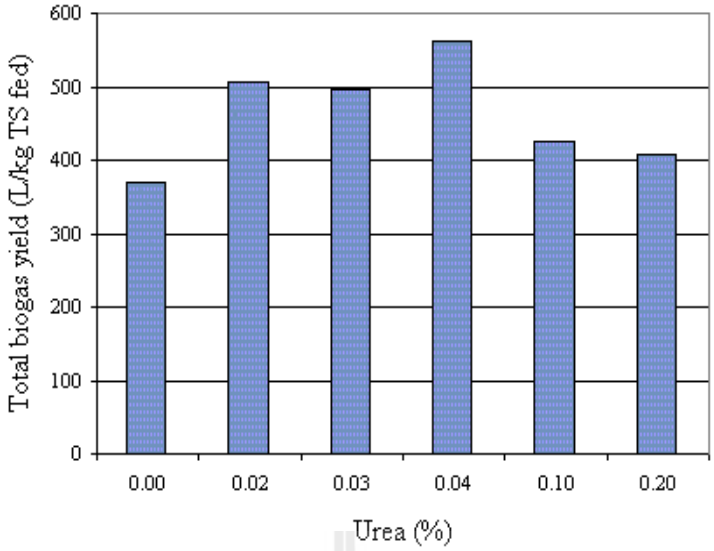

**รูปที่ 3.14** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) โดยใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเติมยูเรียที่ความเข้มข้นต่างกันดังนี้ 0.00 (A), 0.02 (B), 0.03 (C), 0.04 (D), 0.10 (E) และ 0.20 (F) (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร




**รูปที่ 3.14** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) โดยใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเติมยูเรียที่ความเข้มข้น (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) ต่างกันดังนี้ 0.00 (A), 0.02 (B), 0.03 (C), 0.04 (D), 0.10 (E) และ 0.20 (F) ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร




**รูปที่ 3.14** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) โดยใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเติมยูเรียที่ความเข้มข้น (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) ต่างกันดังนี้ 0.00 (A), 0.02 (B), 0.03 (C), 0.04 (D), 0.10 (E) และ 0.20 (F) ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร




**รูปที่ 3.15** ปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ผลิตได้จากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก (ความชื้น 17.34%) ที่ใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเติมยูเรียที่ความเข้มข้นต่างกันดังนี้ 0.00, 0.02, 0.03, 0.04, 0.10 และ 0.20% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ปริมาตรหมัก 5 ลิตร

### 3.6.2 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง

จากผลทดลองผลิตมีเทนก๊าซชีวภาพในเบื้องต้น (ข้อ 3.5.2) โดยใช้กากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาณวัสดุหมัก 10 ลิตร ที่มีค่า Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% ด้วยระบบ Single-stage digester ที่อุณหภูมิห้อง (25-31 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) และใช้เชื้อเริ่มต้นที่พัฒนาตามข้อ 3.2 ปริมาณ 10% (ปริมาตรต่อปริมาตร) เมื่อศึกษาปัจจัยหลักด้านสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์เพื่อการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพ ได้ผลดังนี้

#### 3.6.2.1 ปริมาณกากมันสำปะหลัง (แหล่งคาร์บอน) ที่เหมาะสม

ทดลองหมักก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง (แหล่งคาร์บอน) ด้วยปริมาตรหมัก 10 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) โดยใช้กากมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 15.19%) Total solids 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่เพิ่มแหล่งไนโตรเจนโดยเติมยูเรีย 0.04% พบว่าปริมาณ Total solids ในช่วง 1.0-2.0% ให้ผลการผลิตมีเทนอยู่ในช่วงที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ ความเข้มข้นของมีเทนสูงสุดเมื่อใช้ Total solids 0.5. 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) คือ 53.0, 63.6, 69.7, 71.0 และ 60.6% ที่ระยะเวลาการหมัก 21, 19, 20, 21 และ 20 วัน ตามลำดับ ส่วนที่ Total solids 4.0% นั้น ปริมาณก๊าซมีเทนจะสูงสุดที่ 38.7% เท่านั้น (ตารางที่ 3. 6 ตารางผนวกที่ 7-11 และรูปที่ 3.16-3.18) การใช้กากมันสำปะหลังในปริมาณ Total solids 1.0% มีแนวโน้มการใช้วัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้มีประสิทธิภาพ สังเกตจากที่ได้ผลผลิตก๊าซ

ชีวภาพราว 440 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ที่สูงกว่าปริมาณ Total solids อื่นที่ทดลองในปริมาตรหมัก 10 ลิตร

**3.6.2.2 แหล่งไนโตรเจน**

เลือกกากมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 15.19%) ที่ Total solids 1.0% เพื่อทดสอบหาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของแหล่งไนโตรเจนที่ควรเติมลงในระบบหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน ดังนี้

**1) ชนิดของแหล่งไนโตรเจน**

ชนิดของแหล่งไนโตรเจนโดยประมาณการณ์จากปริมาณแป้งด้วยสัดส่วนตามที่ทดลองสำเร็จจากการใช้หัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ผลิตมีเทนด้วยปริมาตรหมัก 10 ลิตร จึงทดลองใช้กากมันสำปะหลังแห้งปริมาณ Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% หรือแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) 0.088% หรือโพแทสเซียมไนเตรท ($KNO_3$) 0.142% พบว่าการเติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนในปริมาณ 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ให้ผลการผลิตมีเทนดีที่สุด (ตารางที่ 3.6 ตารางผนวกที่ 7, 12 และ 13) จึงได้ทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลังที่ Total solids 1.0% และเติมยูเรียด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกันต่อไป

**2) ปริมาณ (ความเข้มข้น) ของแหล่งไนโตรเจน**

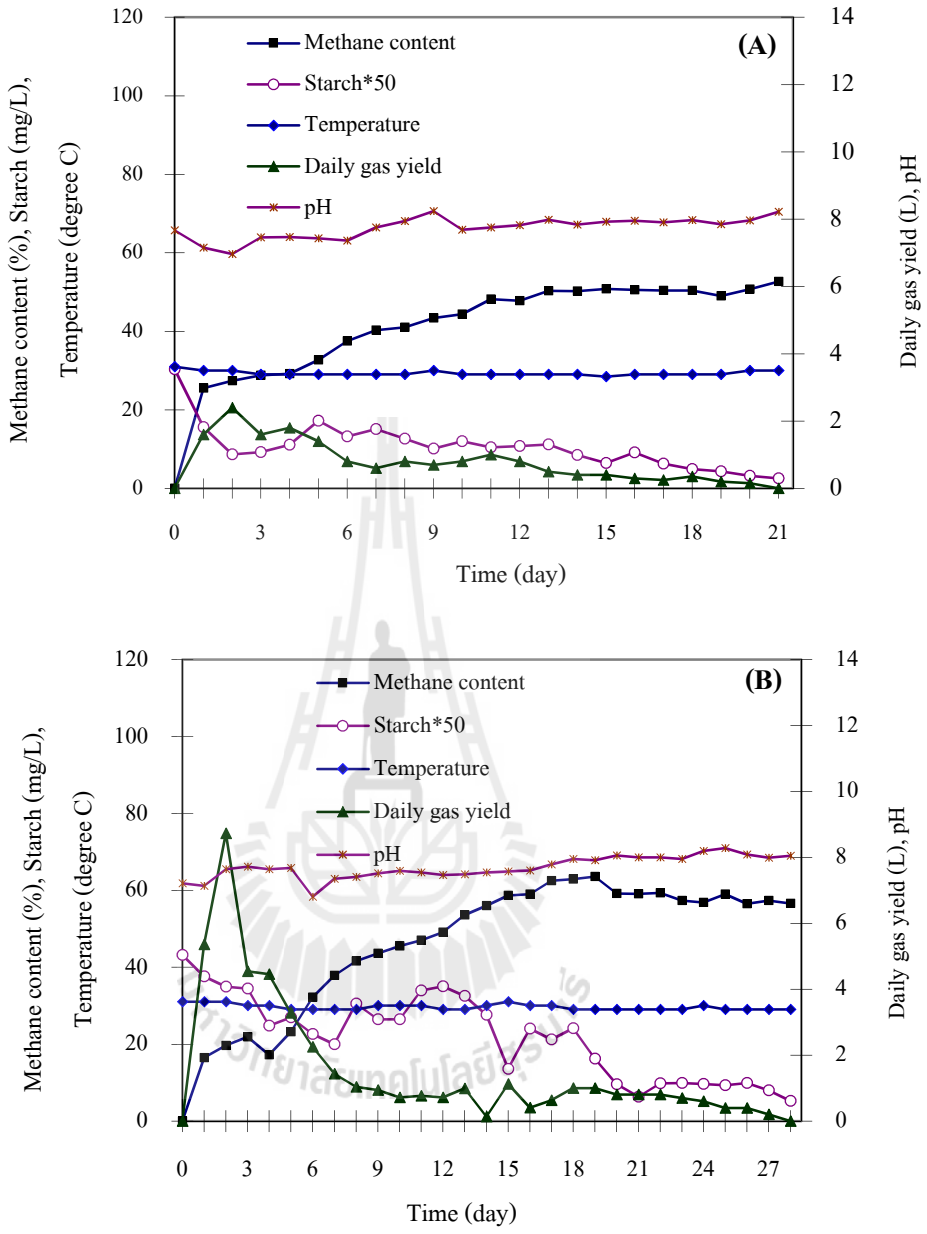
จากผลการศึกษา ยูเรียยังคงเป็นแหล่งไนโตรเจนที่ดีสำหรับใช้ในการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง เช่นเดียวกับจากหัวมันสำปะหลัง จึงทดลองผลิตด้วยปริมาตรหมัก 10 ลิตร ที่ใช้ปริมาณ Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.02, 0.04 และ 0.08% (น้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดเท่ากับ 55.7, 63.6 และ 55.9% โดยปริมาตร ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ 7, 14 และ 15) การเติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนในปริมาณ 0.04% ให้ผลการผลิตมีเทนดีที่สุดจากกากมันสำปะหลัง จึงทดลองผลิตมีเทนด้วยส่วนประกอบกากมันสำปะหลังในปริมาณ Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ด้วยปริมาตรหมัก 50 ลิตร (ข้อ 3.7)

**ตารางที่ 3.6** การทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง (ความชื้น 15.19 %) ที่มีค่า Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ปริมาตรหมัก 10, 20 และ 50 ลิตร (ตารางผนวกที่ 7-13, 16 และ 19)

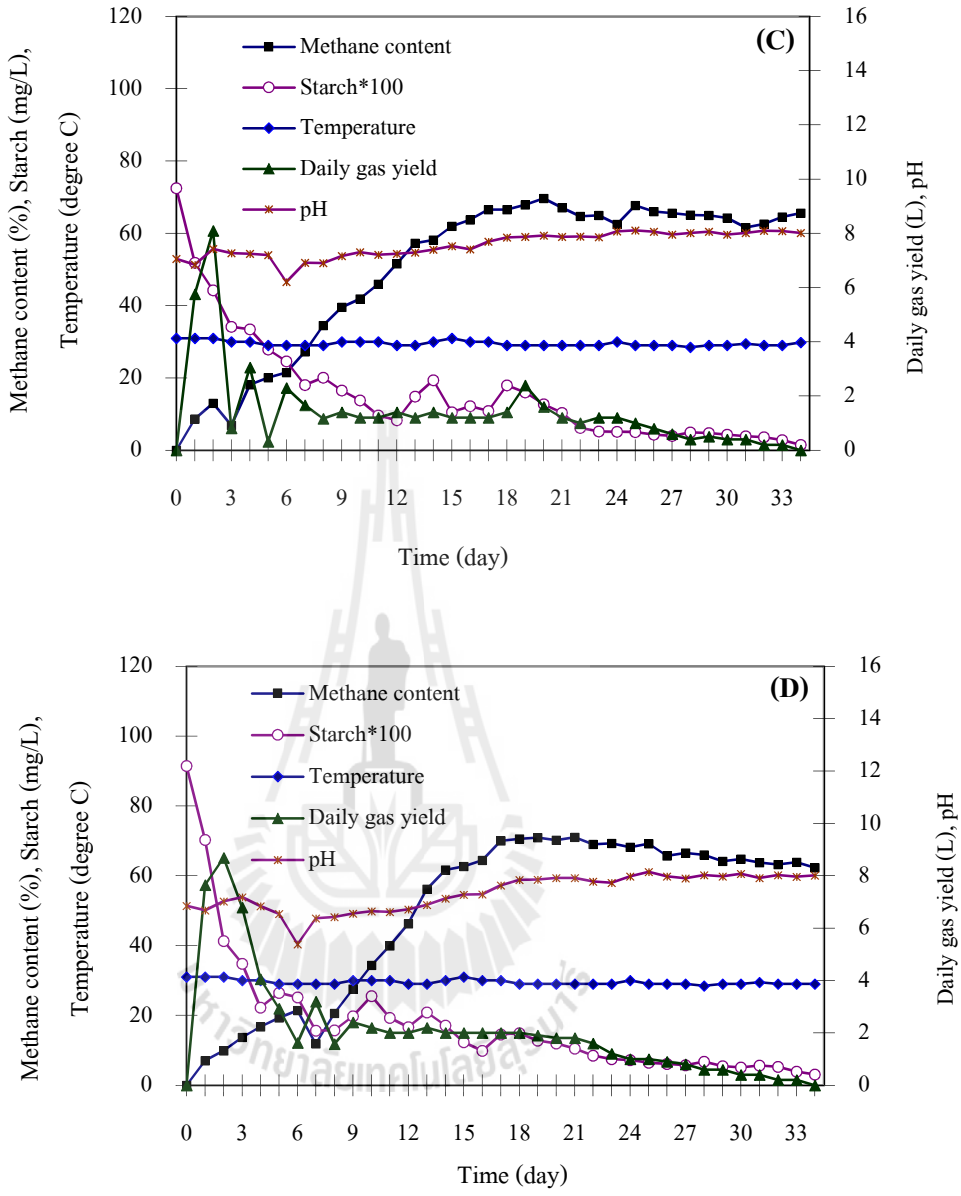
| Substrate | Substrate concentration (%, w/v) | Digestion volume (L) | Retention time (Day) | Maximum methane (%)/ Duration | Total gas yield (L) | Total gas yield (L/kg TS fed) | Starch concentration (mg/L) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 0 day | End of fermentation |
| Cassava pulp concentration (TS) with 0.04% urea | 0.5 | 10 | 22 | 53.0/ Day 21 | 16.85 | 168.50 | 1,515.22 | 127.84 |
| | 1.0 | 10 | 28 | 63.6/ Day 19 | 44.27 | 442.70 | 2,160.26 | 260.53 |
| | 1.5 | 10 | 34 | 69.7/ Day 20 | 49.09 | 327.27 | 4,749.51 | 152.75 |
| | 2.0 | 10 | 34 | 71.0/ Day 21 | 71.72 | 358.60 | 7,147.88 | 305.02 |
| | 3.0 | 10 | 22 | 60.6/ Day 20 | ND | ND | 9,892.24 | ND |
| | 4.0 | 10 | 22 | 38.7/ Day 20 | ND | ND | 10,551.40 | ND |
| Type/concentration of nitrogen source added to 1.0% TS | $(NH_4)_2SO_4$/ 0.088 | 10 | 28 | 60.9/ Day 22 | 32.68 | 326.80 | 2,299.06 | 378.98 |
| | $KNO_3$/ 0.142 | | 28 | 63.6/ Day 24 | 31.49 | 314.90 | 2,290.90 | 138.87 |
| Optimal conditions | 1.0% TS, 0.04% Urea | 20 | 39 | 70.3/ Day 23 | 58.58 | 292.90 | 5,718.58 | 247.05 |
| Optimal conditions | 1.0% TS, 0.04% Urea | 50 | 39 | 70.0/ Day 29 | 148.23 | 296.46 | 4,820.43 | 229.91 |

TS, Total solids

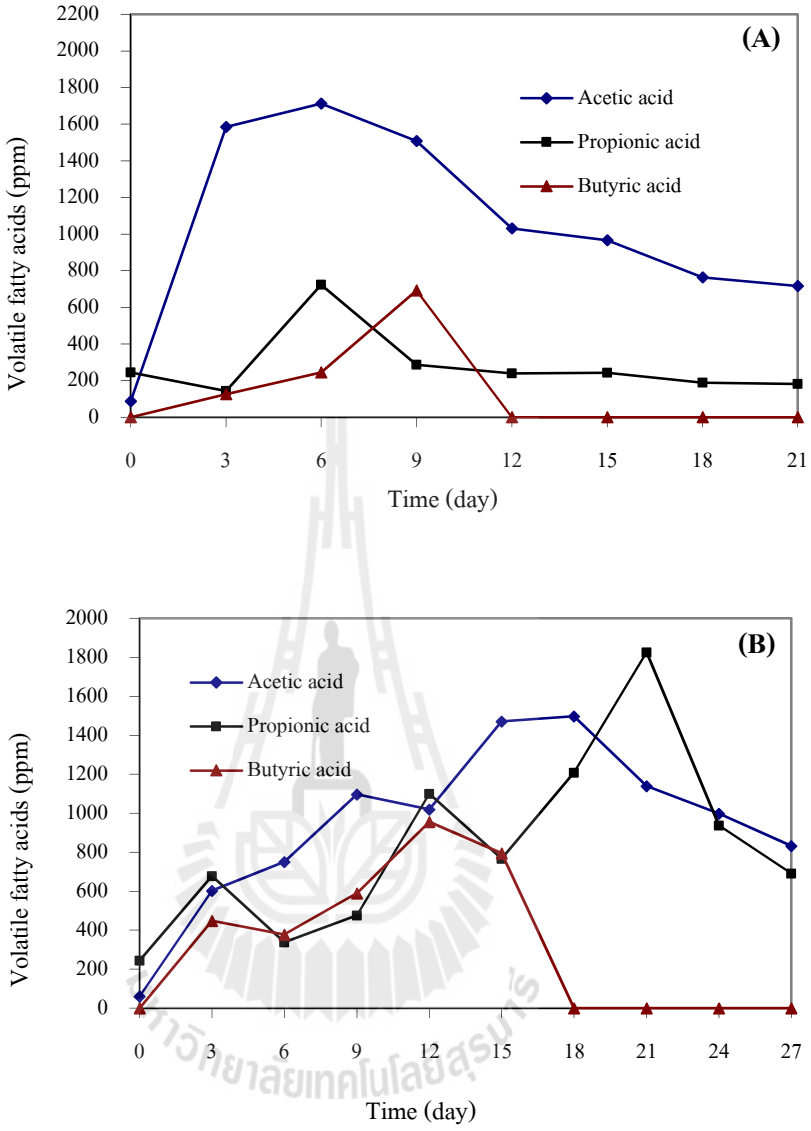
ND, Not determined because of very low rate of biogas production



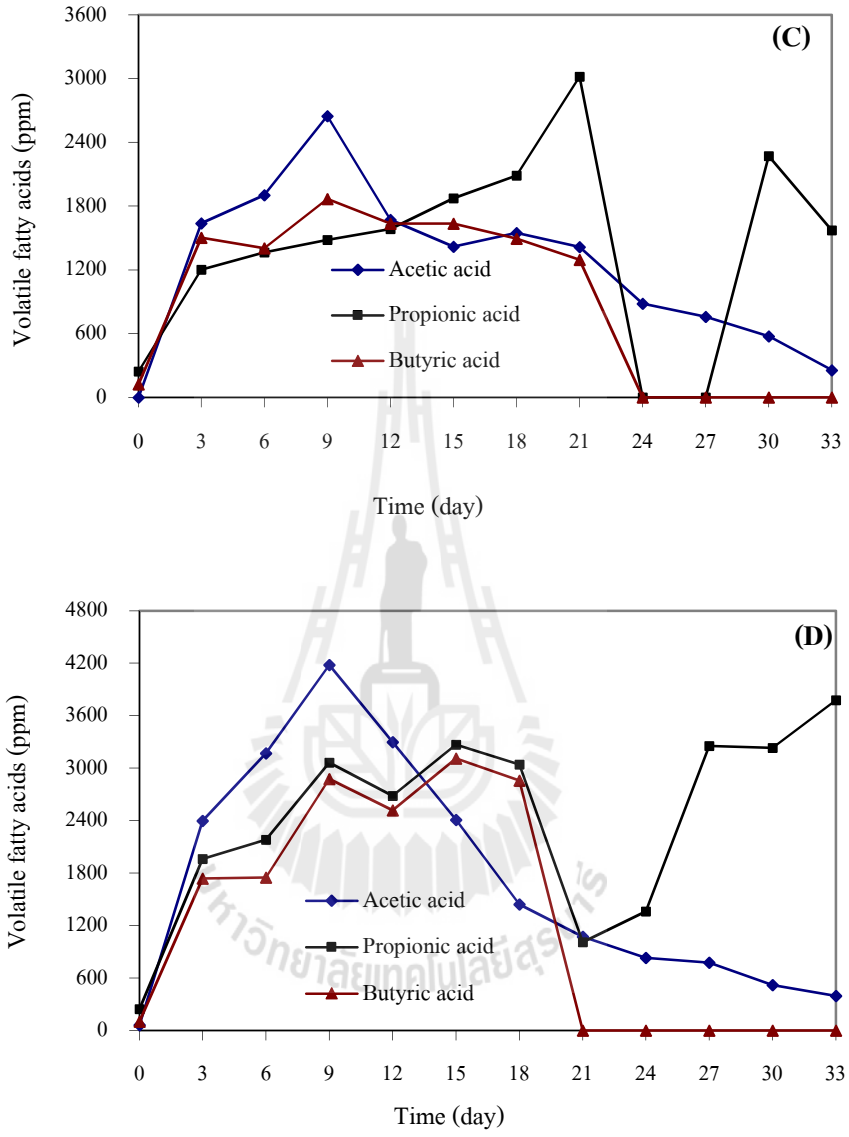

**รูปที่ 3.16** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) 0.5 (A), 1.0 (B), 1.5 (C) และ 2.0 (D) และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร



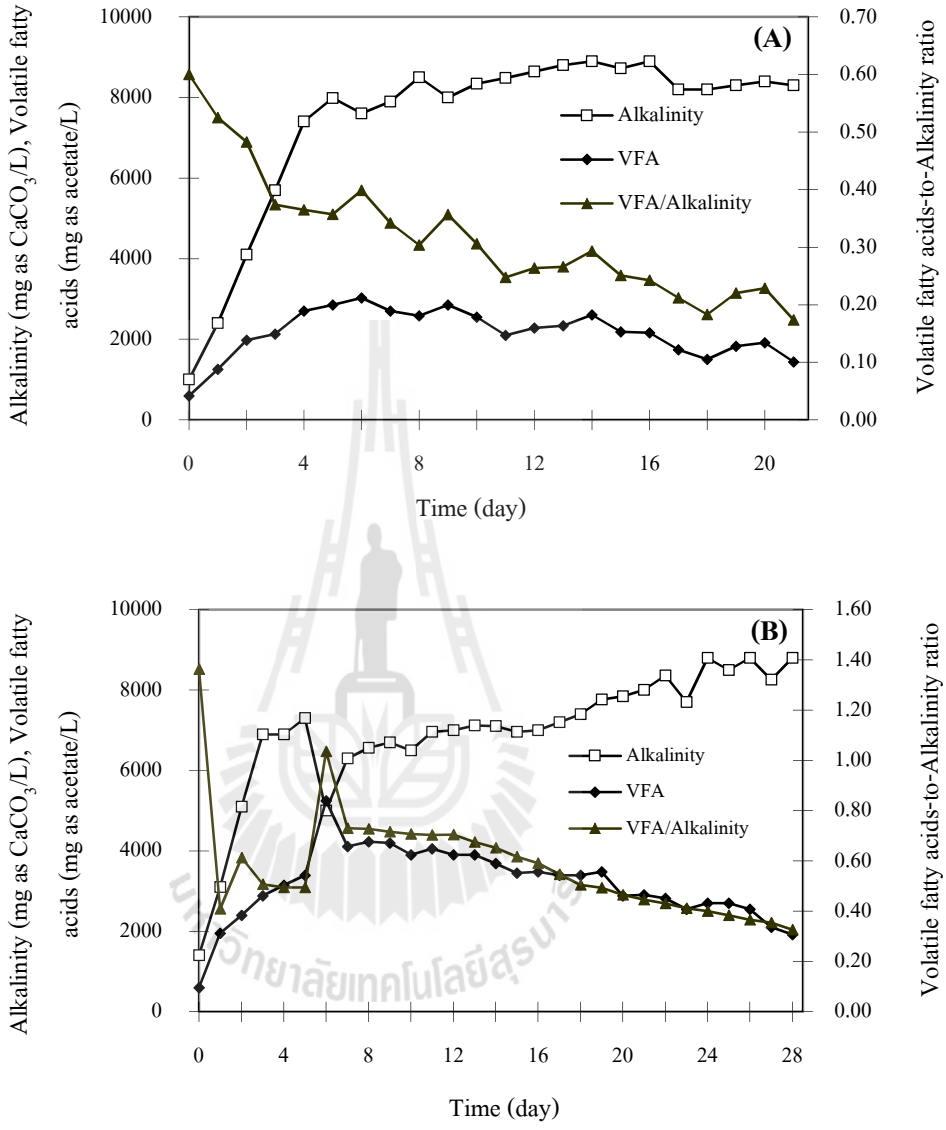

**รูปที่ 3.16** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) 0.5 (A), 1.0 (B), 1.5 (C) และ 2.0 (D) และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร



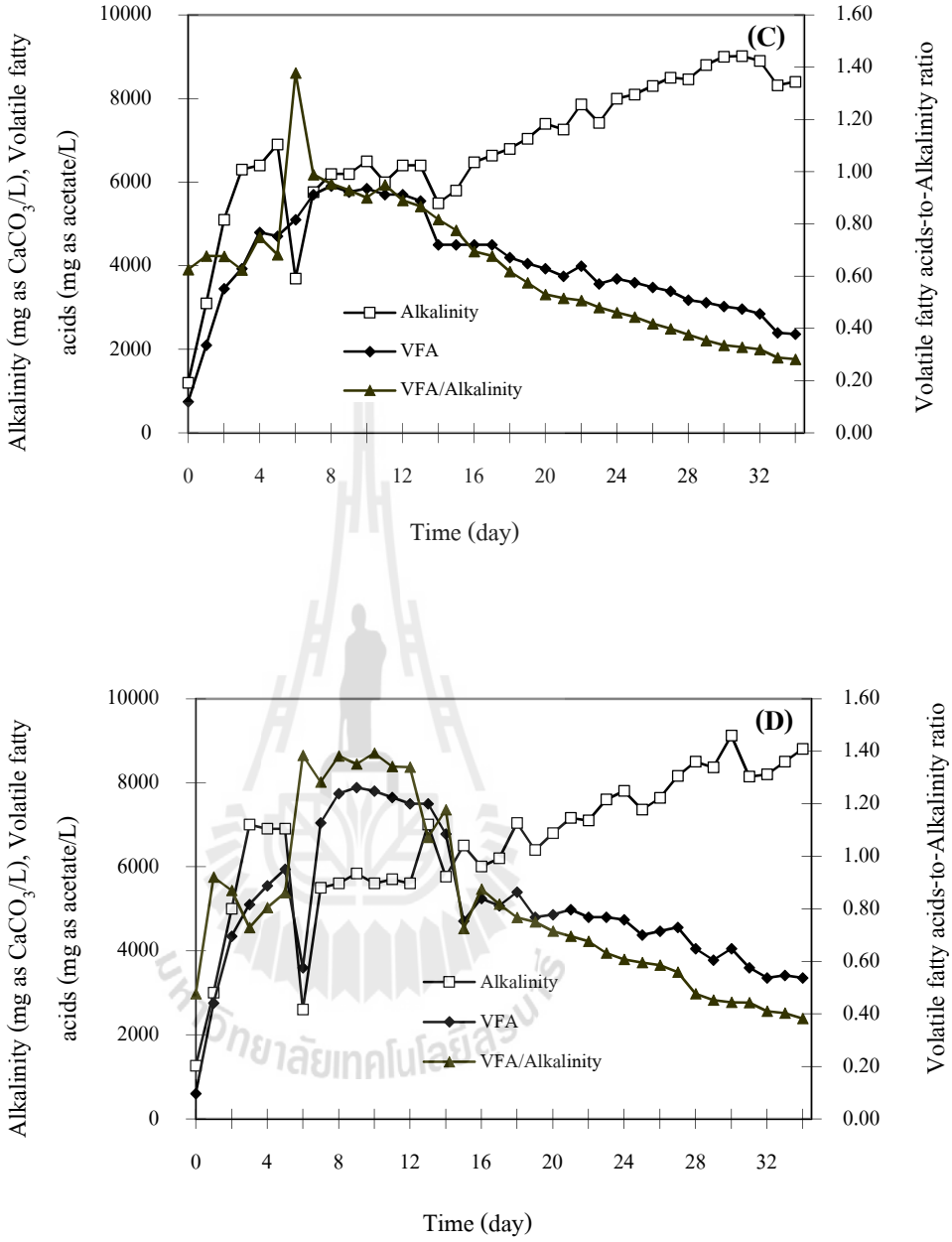

**รูปที่ 3.17** Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) 0.5 (A), 1.0 (B), 1.5 (C) และ 2.0 (D) และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร




**รูปที่ 3.17** (ต่อ) Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) 0.5 (A), 1.0 (B), 1.5 (C) และ 2.0 (D) และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร




**รูปที่ 3.18** Alkalinity และ Volatile fatty acids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) 0.5 (A), 1.0 (B), 1.5 (C) และ 2.0 (D) และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร




**รูปที่ 3.18** (ต่อ) Alkalinity ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids ปริมาณ (%, น้ำหนักต่อปริมาตร) 0.5 (A), 1.0 (B), 1.5 (C) และ 2.0 (D) และเติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร

### 3.7 การทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษา

ทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษาในข้อ 3.6 ใน Single-stage digester ด้วยปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร ดังนี้

#### 3.7.1 การทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลัง

ทดลองผลิตมีเทนให้ได้เป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ โดยใช้หัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ที่ปลูกโดยทั่วไปในพื้นที่ปลูกในจังหวัดนครราชสีมา และหาได้ง่ายในช่วงดำเนินการโครงการนี้ เตรียมหัวมันเป็นชิ้นในลักษณะแห้ง (วิเคราะห์ได้ความชื้นโดยเฉลี่ย 17% และ Total solids 83%) เป็นวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ชีวภาพปริมาตรวัสดุหมัก 20 และ 50 ลิตร ที่มีค่า Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% เป็นแหล่งไนโตรเจน ด้วยระบบ Single-stage digester ที่อุณหภูมิห้อง (25-32 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) และใช้เชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ที่ได้จากการศึกษาชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5 ค) ปริมาณ 10% (ปริมาตรต่อปริมาตร) โดยไม่มีการกวนผสม ควบคุมความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักด้วยการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 0.25% โดยปริมาตร เมื่อพบอัตราส่วนของ Volatile fatty acids ต่อ Alkalinity มีค่ามากกว่า 0.8 เก็บตัวอย่างน้ำหมักทุกวันเพื่อวิเคราะห์ตามข้อ 2.2.4 ตั้งแต่เริ่มต้นหมักและตลอดระยะเวลาการหมักที่สิ้นสุดจากการสังเกตว่าไม่มีก๊าซที่สามารถตรวจนับปริมาณได้เกิดขึ้น ได้ผลการทดลองดังนี้

ก. ปริมาตรหมัก 20 ลิตร

การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (ความชื้น 17.34%) ด้วย Total solids ปริมาณ 1% เติมยูเรีย 0.04% โดยปริมาตร ใช้เวลาผลิตก๊าซทั้งสิ้น 35 วัน ที่อุณหภูมิในช่วง 29-31 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพรวม 468 ลิตร ที่มีความเข้มข้นของก๊าซมีเทน ($CH_4$) เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพสูงสุด 77% โดยปริมาตร และมีช่วงเวลาที่มีการผลิตก๊าซที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนคงที่ในช่วง 70-77% โดยปริมาตร เป็นเวลา 17 วัน ตั้งแต่หมักได้ 17 วัน จนถึงวันที่ 33 และสิ้นสุดกระบวนการหมักในวันที่ 35 เนื่องจากไม่มีการเติมหัวมันสำปะหลังหรือสารอาหารใดๆ เพิ่มให้จุลินทรีย์ (ตารางที่ 3.7 ตารางผนวกที่ 3 และรูปที่ 3.19)

ข. ปริมาตรหมัก 50 ลิตร

การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังด้วยปริมาตรหมัก 50 ลิตร ได้ทดลองเปรียบเทียบการใช้หัวมันสำปะหลัง 2 พันธุ์ คือ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) และพันธุ์ระยอง 5 ซึ่งมีองค์ประกอบของแป้งมากกว่าพันธุ์ CMR 35-22-196 (ตารางที่ 3.1) พบว่าเมื่อผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) กิจกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์สิ้นสุดภายใน 38 วัน ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 313 ลิตร (หรือ 363 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้น 52%) เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น เท่ากับ 626 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบก๊าซพบว่ามีก๊าซมีเทนสูงที่สุดคือ 75.9% โดยปริมาตร

ที่ระยะเวลาการหมัก 21 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดเท่ากับ 52% โดยปริมาตร (ตารางที่ 3.7 ตารางผนวกที่ 17 และรูปที่ 3.19)

ในกระบวนการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 นี้ มี pH อยู่ในช่วง 6.34-8.30 โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 8.30 และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 4 วันแรก โดยลงมาที่ค่า 6.34 และค่อยๆ เพิ่มจนมีค่า pH เท่ากับ 8.14 ที่วันสิ้นสุดการผลิตก๊าซชีวภาพ ค่าความเป็นกรดไขมันมันระเหย (Volatile fatty acids) อยู่ในช่วง 750-6,900 มิลลิกรัมในรูปของอะซิเตทต่อลิตร (mg as acetate/L) ส่วนความเป็นด่างทั้งหมด (Alkalinity) อยู่ในช่วง 1,400-5,800 มิลลิกรัม (mg as $CaCO_3$/L) อัตราส่วนระหว่างค่าความเป็นกรดไขมันมันระเหยต่อความเป็นด่างทั้งหมด (VFA/A) ที่เริ่มต้นการหมักเท่ากับ 0.54 และลดลงจนถึง 0.29 เมื่อสิ้นสุดระยะการหมัก (ตารางผนวกที่ 17 และรูปที่ 3.19-3.20) ค่า VFA/A ที่ระบุข้างต้นเป็นค่าเช่นเดียวกับค่าช่วงที่มีรายงานว่าเหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Water Pollution Control Federation, 1987)

ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังนี้ ปริมาณผลผลิตก๊าซสูงสุดในสัปดาห์แรกของการหมักเป็นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงมิได้สัมพันธ์กับความเข้มข้นของมีเทนที่สูง เมื่อทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังพันธุ์เดียวกันที่ขยายกำลังการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ พบปริมาณมีเทนโดยเฉลี่ยที่เป็นส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (50, 56 และ 52% ตามลำดับ) จากที่สามารถผลิตมีเทนได้ทั้งหมด 246, 262 และ 322 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed สำหรับปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.22)

เมื่อเริ่มเติมวัตถุดิบลงในถังหมัก จุลินทรีย์ในกลุ่ม Acid-forming bacteria เจริญอย่างรวดเร็วเกิดสภาวะกรดซึ่งมีผลลดการเจริญของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) และกระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) การรักษาค่า pH ให้ใกล้เคียงกับ pH ที่เป็นกลางกระทำได้โดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อเพิ่มความเป็นด่างในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (Cuzin *et al*., 1992) การศึกษาครั้งนี้ได้เติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0.25% (น้ำหนักต่อปริมาตร) จำนวน 4 ครั้ง ในสัปดาห์แรกของการหมักในทุกขนาดบรรจุของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ จากนั้นค่า pH ของวัสดุในถังหมัก (Digestion slurry) ค่อนข้างคงที่ที่ pH 7-8 ตลอดกระบวนการหมัก จากผลการทดลองพบว่าระหว่างกระบวนการหมักที่ได้มีเทนเป็นส่วนประกอบมากกว่า 50% นั้น ค่า pH ของ Digestion slurry อยู่ในช่วง 7.2-8.4 และ 7.5-8.2 ในที่ปริมาตรหมักที่มี Alkalinity (A) ในช่วง 5,500-7.300, 7,800-9,000 และ 3,700-5,800 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า Volatile fatty acids (VFA) ในช่วง 1,500-2,285, 1,500-5,300 และ 1,500-4,200 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร ตามลำดับ ในสภาวะการหมักที่ไม่มีการกวนอาจเกี่ยวข้องกับความไม่สม่ำเสมอของค่าวิเคราะห์ที่ได้รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุในถังหมัก (ตารางผนวกที่ 2, 3 และ 17)

ส่วนการสะสม Volatile fatty acids (Acetic, Propionic และ Butyric acids) ระหว่างกระบวนการหมักหัวมันสำปะหลังนั้น พบว่ามี Propionic acid และ Butyric acid ที่สูงกว่า Acetic acid ในทุกขนาดของถังหมัก ซึ่ง Methanogenic bacteria จะใช้ Acetic acid ได้เร็วมาก (ตารางผนวกที่ 2, 3 และ 17 และรูปที่ 3.21)

สำหรับการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 ความชื้น 14.18% ที่มีปริมาณแป้งสูงกว่าพันธุ์ระยอง 11 (ตารางที่ 3.1) ในปริมาตรหมัก 50 ลิตร ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ 76% โดยปริมาตร เมื่อหมักเป็นเวลา 19 วัน ได้ก๊าซสะสม 304 ลิตร คิดเป็นปริมาณของมีเทน 185 ลิตร จากที่ค่าเฉลี่ยของมีเทนที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 61% โดยปริมาตร (ตารางที่ 3.7 ตารางผนวกที่ 18 และรูปที่ 3.23)

ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพราว 77% โดยปริมาตร ในวันที่ 3 ของการหมัก จากนั้นจะลดลงเป็นลำดับเมื่อระยะเวลาหมักนานขึ้น ทำนองเดียวกับการสะสม Volatile fatty acids และเป็นสัดส่วนผกผันกับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 3.23 และตารางผนวกที่ 18) แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีของการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน

อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากการทดลองหมักครั้งนี้ในช่วง 38 วัน อยู่ในช่วง 29-31 องศาเซลเซียส จากการทิ้งให้การหมักเกิดที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำหมัก (Slurry) โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.6-8.3 มีการปรับ pH ด้วยการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตในสัปดาห์แรกของการหมัก พบสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) อยู่ในช่วง 1,400-5,800 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L as $CaCO_3$) ปริมาณ Volatile fatty acids อยู่ในช่วง 750-6,900 มิลลิกรัม (mg/L as acetate) และอัตราส่วนของ Volatile fatty acids ต่อ Alkalinity ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 0.8 ซึ่งค่าที่ตรวจพบระหว่างกระบวนการหมักเหล่านี้อยู่ในช่วงที่มีการรายงานถึงการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดี กรดอินทรีย์ที่เป็น Volatile fatty acids (VFA) พบว่า Acetic acid เป็นผลผลิตหลัก ปริมาณ VFA ที่ตรวจพบหมดไปเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก (ตารางผนวกที่ 18 และรูปที่ 3.24-3.25)

ปริมาณ Total solids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตมีเทน ไม่ได้วิเคราะห์เนื่องจากผลการวิจัยพื้นฐานของผู้วิจัยพบการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงยังมีโครงสร้างของเยื่อใยที่แข็งแรง ย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ยาก คงเหลือในปริมาณใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการหมัก ส่วนปริมาณแป้งที่วิเคราะห์ในรูปของน้ำตาลลดลงอย่างรวดเร็วสัมพันธ์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ตารางผนวกที่ 18 และรูปที่ 3.23)

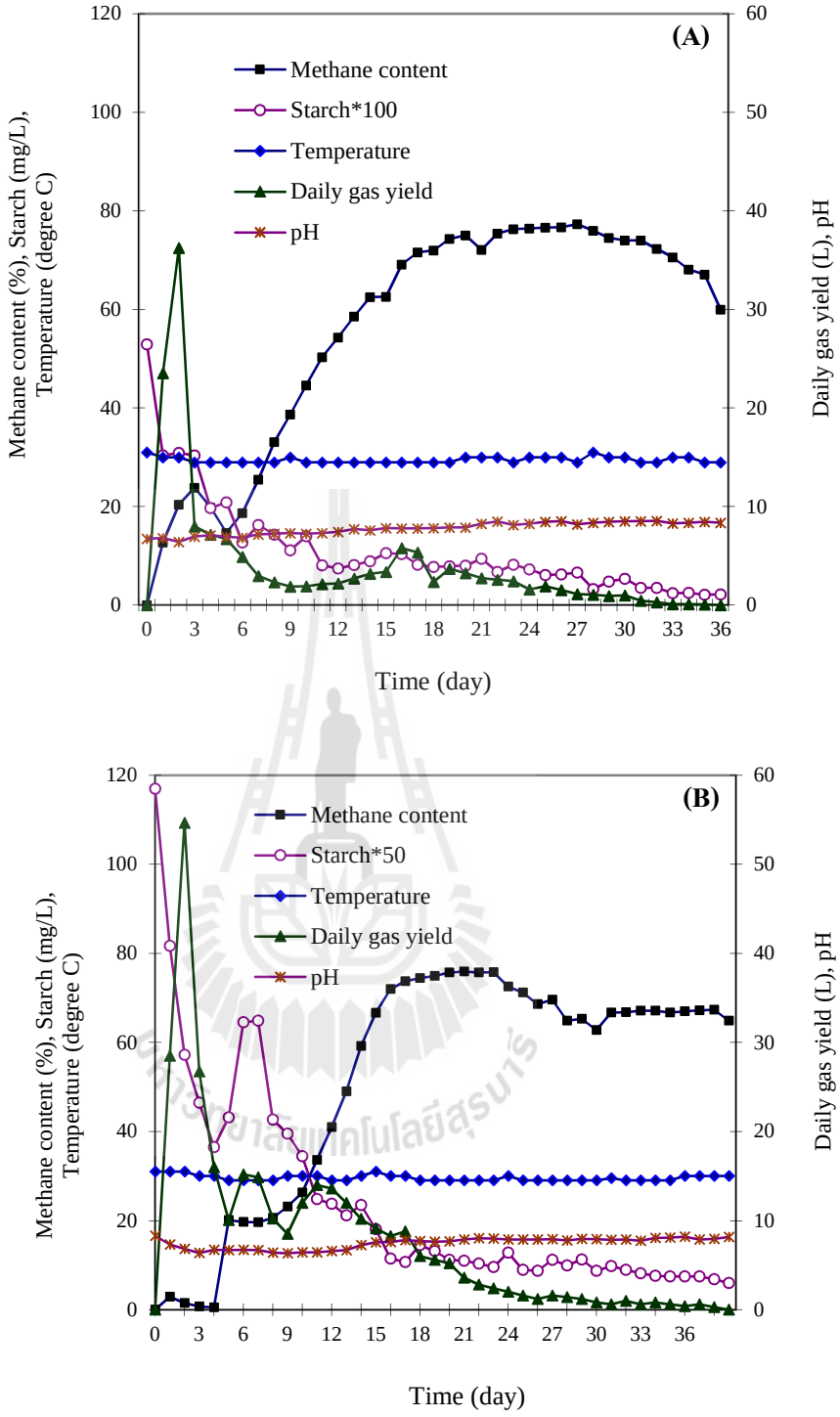
การผลิตมีเทนปริมาตร 50 ลิตร ที่ใช้หัวมันสำปะหลังดิบพันธุ์ระยอง 5 ทำแห้งทั้งเปลือกความชื้น 14.18%) นี้ เพิ่มการตรวจหาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($H_2S$) ที่ตรวจพบในระบบหมักปริมาณน้อยมาก (ตรวจวัดได้ 298 ppm ที่ค่ามีเทนสูงสุด 76% โดยปริมาตร เมื่อหมักเป็นเวลา 19 วัน แต่มิได้แสดงค่าการวิเคราะห์ทั้งหมดในรายงานนี้) อาจเนื่องจากสารอาหารในระบบหมักไม่ส่งเสริมการผลิตก๊าซดังกล่าว

มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งหมด 608 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed (เทียบเท่า 340 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้น 56%) มีปริมาณมีเทน (ที่มีความเข้มข้นโดยเฉลี่ย 61%) 340 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed (ตารางผนวกที่ 18) ดังนั้นสามารถทดลองปรับระบบเพื่อให้มีการผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และยังคงมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบมากกว่า 60% โดยทดลองเติมสารอาหารเพิ่มได้ตั้งแต่วันที่ 10 ของการหมัก แต่ถ้าต้องการความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบอย่างน้อย 70% สามารถทดลองเติมสารอาหารเพิ่มได้ตั้งแต่วันที่ 12 ของการหมัก ทั้งนี้ขึ้นกับประสิทธิภาพของเชื้อเริ่มต้น

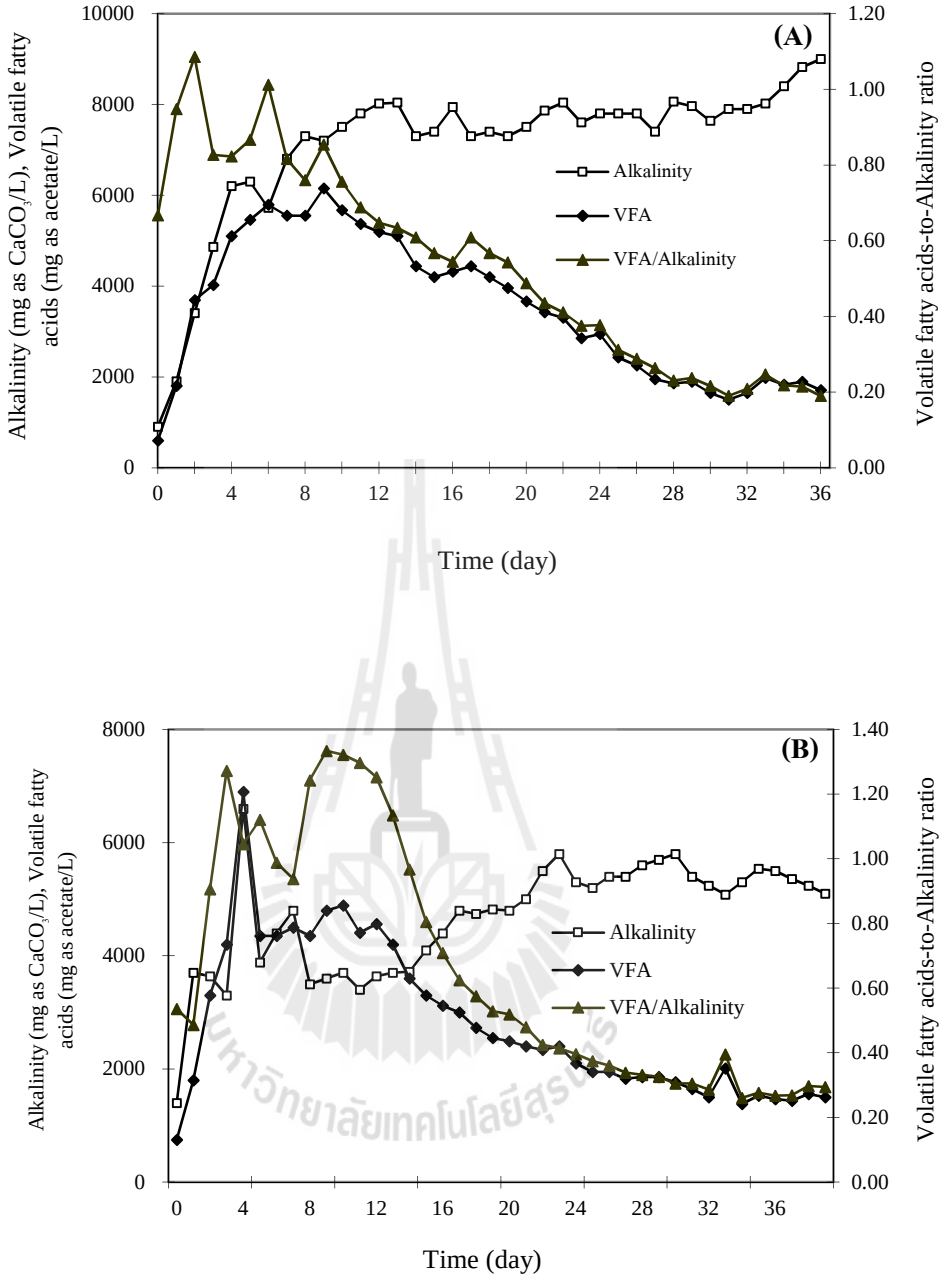
**ตารางที่ 3.7** การผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22 (A, ความชื้น 17.34%) และพันธุ์ระยอง 5 (B, ความชื้น 14.18%) ที่มีค่า Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร

| Parameter | Reaction volume (L) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 5 | 20 | 50 (A) | 50 (B) |
| Retention time (Day) | 18 | 35 | 38 | 35 |
| Total biogas yield (L) | 27.02 | 93.68 | 313.02 | 304.00 |
| Total biogas yield (L/kg Total solids fed) | 540.40 | 468.40 | 626.04 | 608.00 |
| Average methane content (%, v/v) | 50 | 56 | 52 | 61 |
| Maximum methane content (%, v/v)/ Duration | 66.1/ Day 9 | 76.7/ Day 27 | 75.9/ Day 21 | 76/ Day 19 |
| Total methane yield (L) | 12.19 | 52.40 | 161.08 | 185.26 |
| Total methane yield (L/kg Total solids fed) | 245.88 | 261.98 | 322.16 | 370.52 |

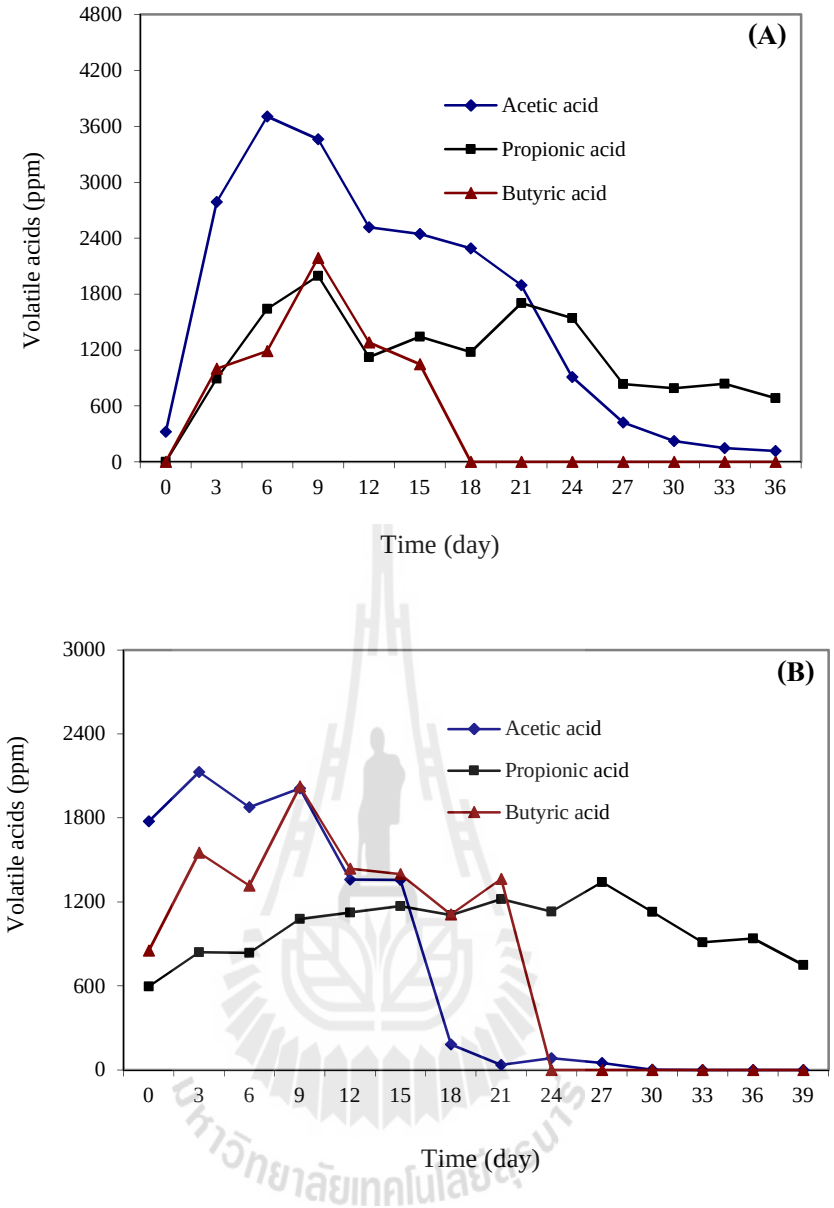
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



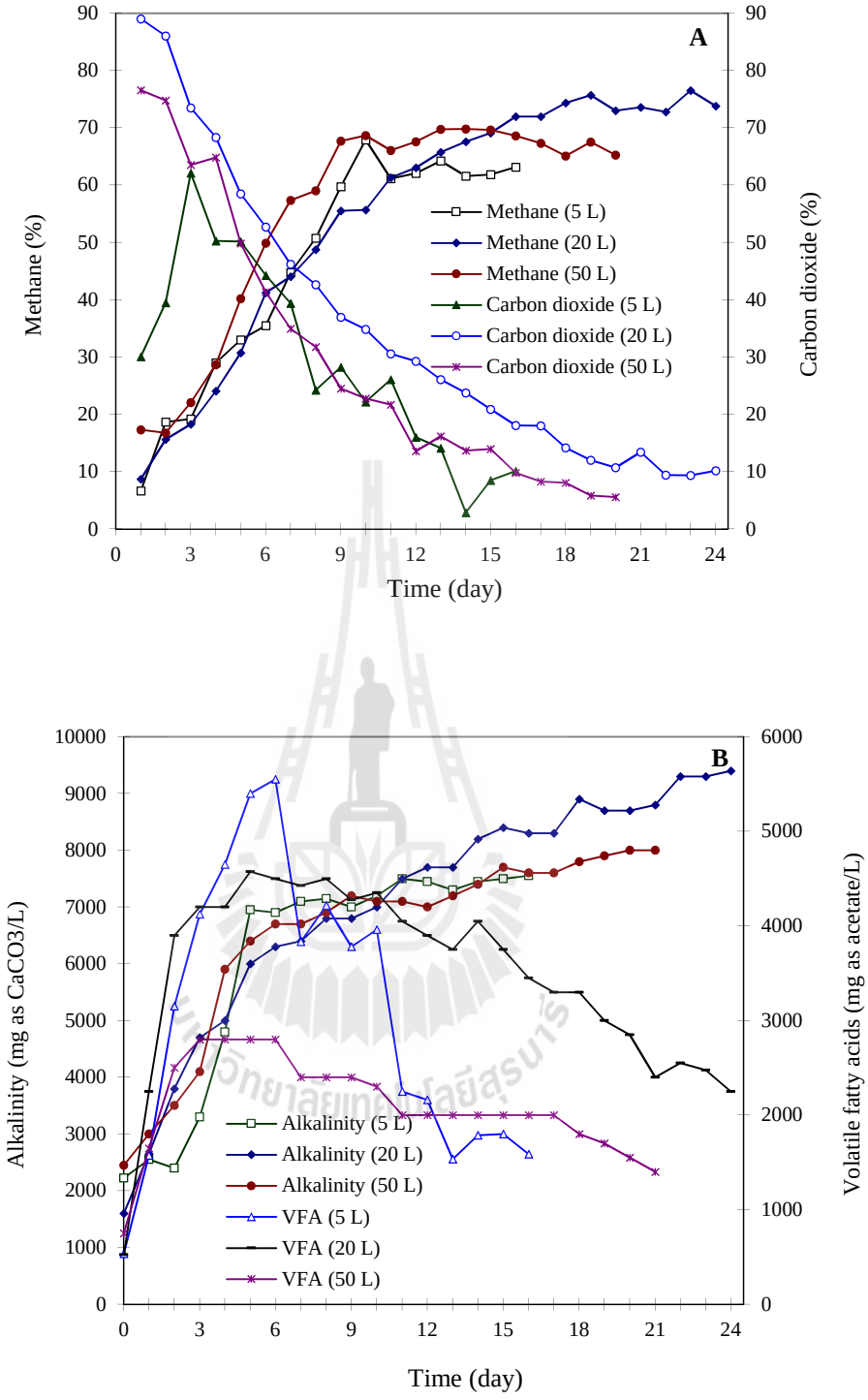

**รูปที่ 3.19** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ที่มีความชื้น 17.34% ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 (A) และ 50 (B) ลิตร



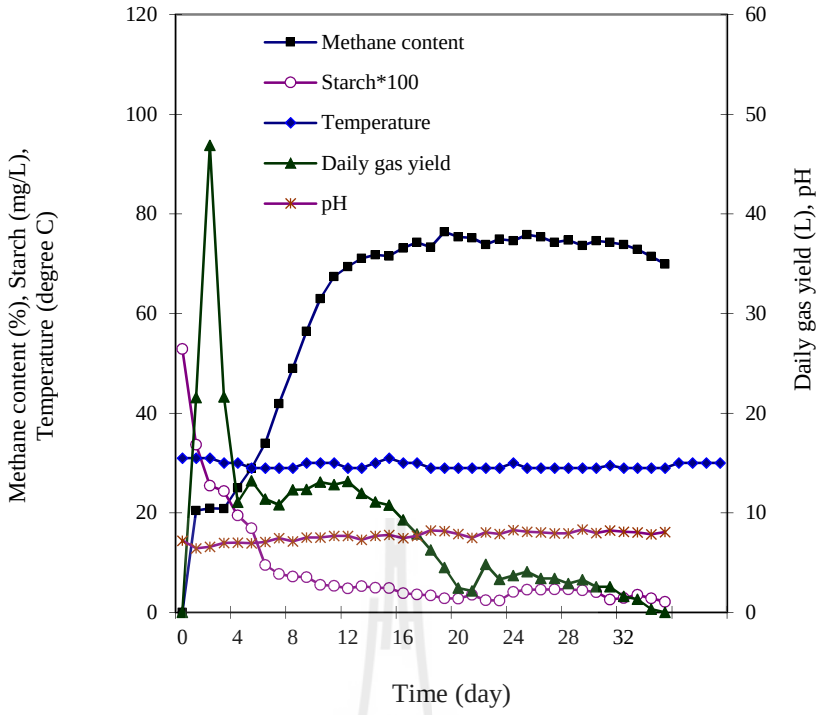

**รูปที่ 3.20** Alkalinity และ Volatile fatty acids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ที่มีความชื้น 17.34% ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 (A) และ 50 (B) ลิตร



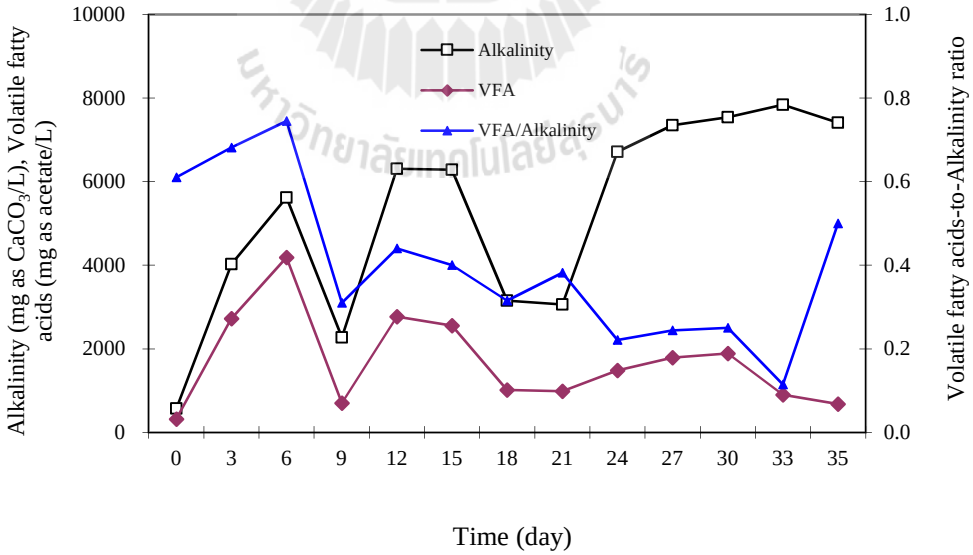

**รูปที่ 3.21** Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ที่มีความชื้น 17.34% ใช้ Total solids ปริมาณ 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 (A) และ 50 (B) ลิตร



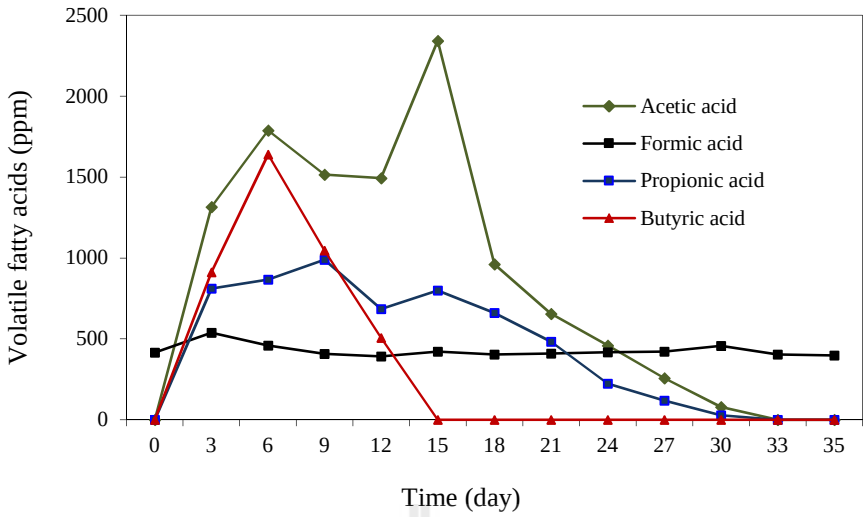

**รูปที่ 3.22** ส่วนประกอบของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพ (A) และค่า Alkalinity และ Volatile fatty acids (VFA) (B) ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการหมัก โดยใช้หัวมันสำปะหลังใน Single-stage digesters ที่มีปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร




**รูปที่ 3.23** การผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือก พันธุ์ระยอง 5 ความชื้น 14.18% ใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร




**รูปที่ 3.24** Alkalinity และ Volatile fatty acids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 ความชื้น 14.18% ใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร




**รูปที่ 3.25** Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 ความชื้น 14.18% ใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร

### 3.7.2 การทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง

ทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง เป็นเศษที่เหลือจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แต่ยังคงมีธาตุอาหารสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และมีการนำกากมันสำปะหลังไปใช้ประโยชน์แทนการฝังกลบของโรงงาน ได้แก่ การนำไปใช้ผสมอาหารสัตว์ในมันเส้น (อาหารโคและปลา) เพาะเห็ดฟาง ทำปุ๋ย และถ้าต้องการนำไปเป็นเชื้อเพลิง ต้องมีกระบวนการลดความชื้น เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีความชื้นสูง (Biomass information, 2003)

จากผลการศึกษาปริมาณของกากมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 15.19%) ที่เหมาะสม (แหล่งคาร์บอน) คือ Total solids 1.0% เพื่อผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ ปริมาณมีเทน และปริมาณของแป้ง จากการทดลองผลิตมีเทนในปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส ขณะทดลองขั้นตอนนี้) พบการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วง 6.8-8.2 และ 6.6-8.3 Volatile fatty acids อยู่ในช่วง 420-7,050 และ 750-4,800 มิลลิกรัมในรูปของอะซิเตทต่อลิตร (mg as acetate/L) ส่วนความเป็นด่าง (Alkalinity) อยู่ในช่วง 1,420-8,720 และ 1,400-8,600 มิลลิกรัมในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร (mg as $CaCO_3$/L) อัตราส่วนระหว่างค่าความเป็นกรดไขมันระเหยต่อความเป็นด่างทั้งหมด เริ่มต้นการหมักเท่ากับ 0.30 และเพิ่มขึ้นในช่วงต้นการหมักและค่อยๆ ลดลงจนถึง 0.20 เมื่อสิ้นสุดระยะการหมัก ส่วนปริมาตรหมักที่ 50 ลิตร มีค่าเท่ากับ 0.54 และลดลงจนมีค่าเท่ากับ 0.21 เมื่อสิ้นสุดการหมักเช่นเดียวกัน (รูปที่ 3.26-3.28 และตารางผนวกที่ 16 และ 19 )

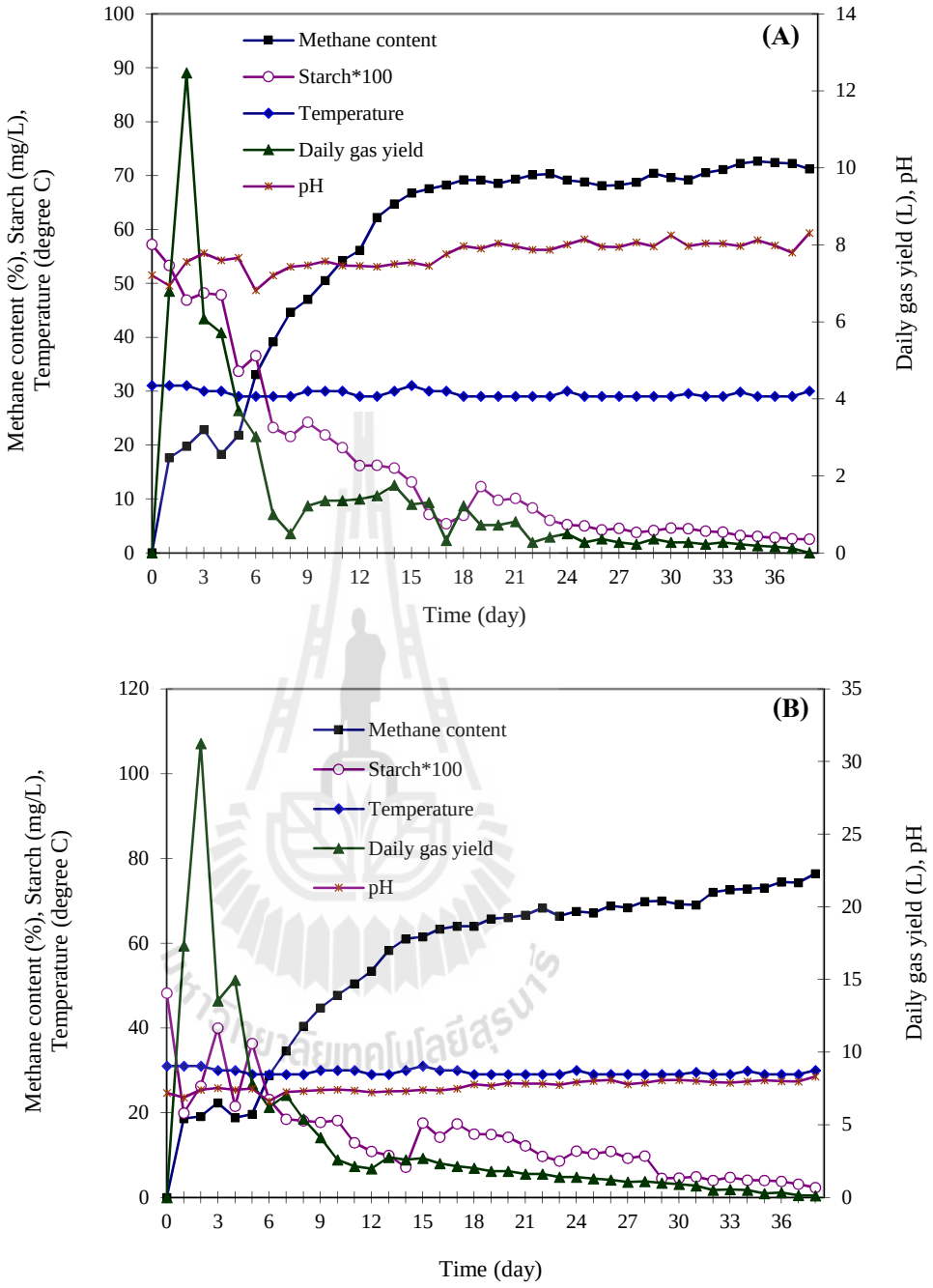
Volatile fatty acids มีความเข้มข้นของ Acetic, Propionic และ Butyric acids ที่ปริมาตรหมัก 20 ลิตร อยู่ในช่วง 0-1,385, 0-1,056.69 และ 0-1,141.66 และที่ปริมาตรหมัก 50 ลิตร อยู่ในช่วง 60.82-2,975.48, 244.72-3,019 และ 0-2,714.22 ppm ตามลำดับ Acetic acid ในช่วงแรกของการหมัก มีความเข้มข้นสูงและค่อยๆลดลงเมื่อสิ้นสุดระยะการหมัก เนื่องจากมีการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมีเทน (รูปที่ 3.27 และตารางผนวกที่ 16 และ 19)

ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร ทั้งสิ้น 59 และ 148 ลิตร ตามลำดับ เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น 293 และ 296 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณมีเทนที่มีความเข้มข้น 57 และ 56% เท่ากับ 167 และ 165 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed (ตารางผนวกที่ 16 และ 19) องค์ประกอบก๊าซที่เป็นมีเทนสูงที่สุดคือ 72.6% ที่ระยะเวลาการหมัก 35 วัน และ 75.4% ที่ระยะเวลาการหมัก 38 วัน ตามลำดับ (ตารางที่ 3.8 รูปที่ 3.26 และตารางผนวกที่ 19) หากใช้กากมันสำปะหลังสดที่มีความชื้น 83% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีมีเทนไม่น้อยกว่า 56% โดยปริมาตร ได้ 69 ลิตรต่อกิโลกรัม

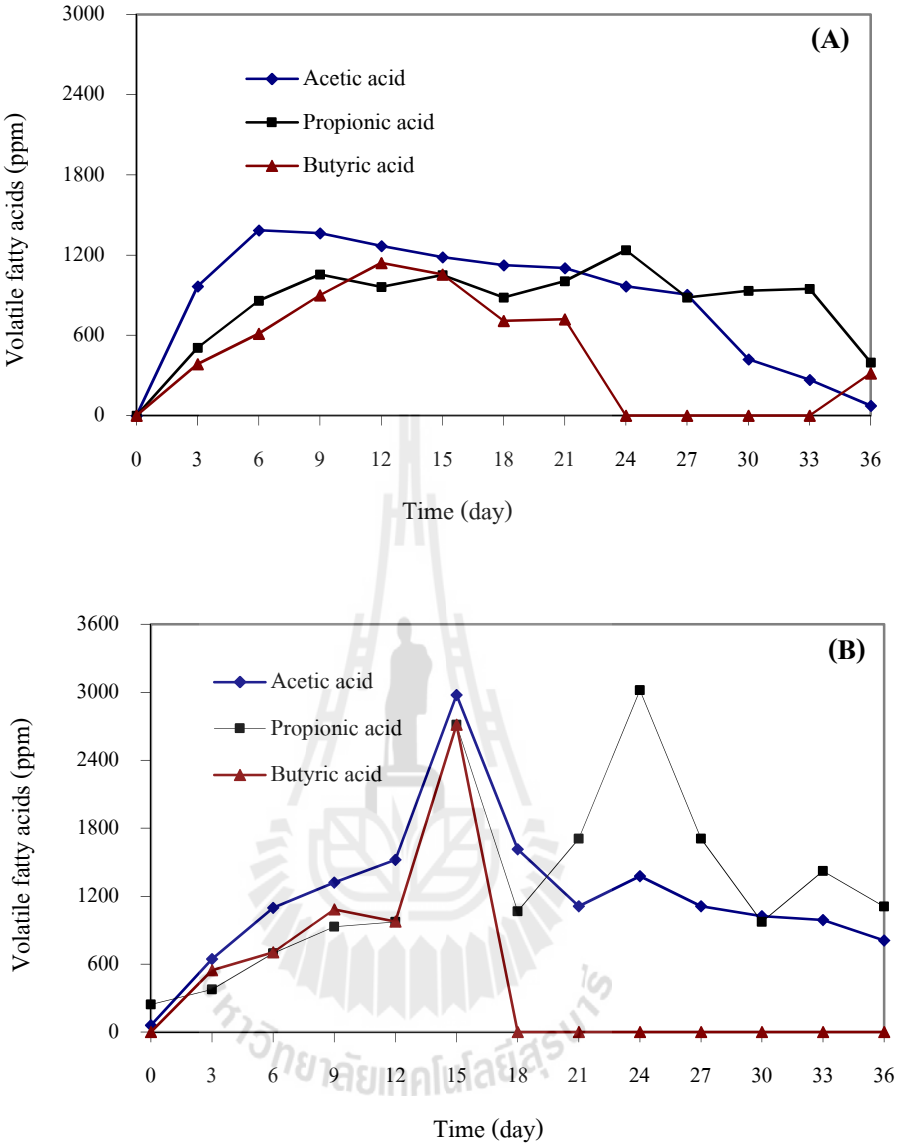
**ตารางที่ 3.8** การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง (ความชื้น 15.19%) ที่มีค่า Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร

| Parameter | Reaction volume (L) | |
|---|---|---|
| | 20 | 50 |
| Retention time (Day) | 38 | 38 |
| Total biogas yield (L) | 58.58 | 148.23 |
| Total biogas yield (L/kg Total solids fed) | 292.90 | 296.46 |
| Average methane content (%, v/v) | 57 | 56 |
| Maximum methane content (%, v/v)/ Duration | 72.6/ Day 35 | 76.4/ Day 38 |
| Total methane yield (L) | 33.41 | 82.24 |
| Total methane yield (L/kg Total solids fed) | 167.07 | 164.83 |

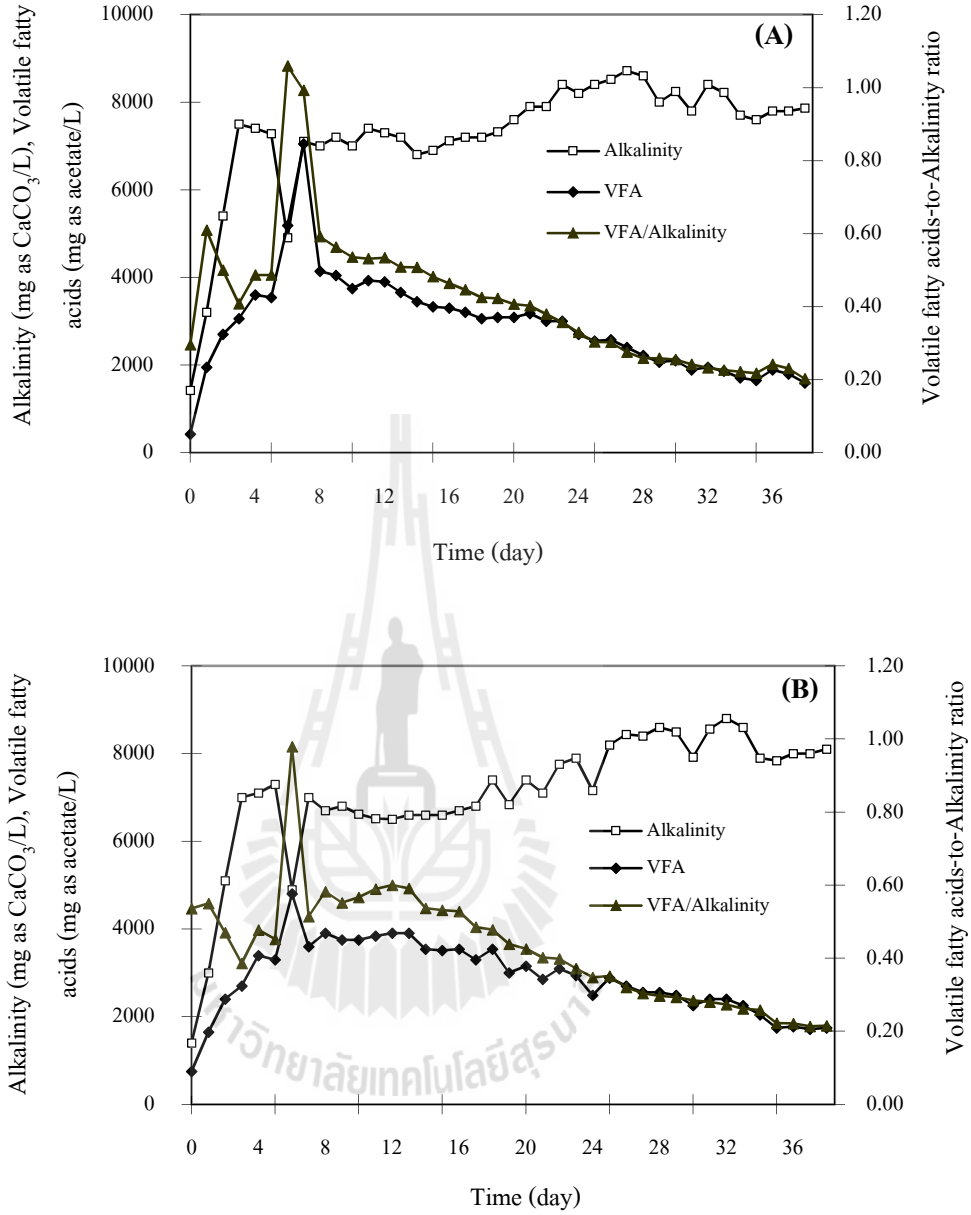
เมื่อเปรียบเทียบการศึกษาของโครงการนี้กับการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการตามที่มีรายงาน ผลที่ได้นี้จัดได้ว่ามีประสิทธิภาพสูง ดังเช่น นริศรา สิทธิวงศ์ และคณะ (2552) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง (ความชื้น 72.53%) มีส่วนประกอบหลักคือ Organic carbon, Total nitrogen, Crude fiber, Protein และ Total solids เท่ากับ 38.14, 0.72, 3.86, 0.65 และ 27.47% ตามลำดับ ในรูป Total solids เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0% และยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน (ตามที่รายงานโดย Anunputtikul, 2004) อัตราส่วน C:N ที่ 10:1, 20:1 และ 30:1 ปริมาตรหมัก 3.75 ลิตร ในถังหมักขนาด 5 ลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 153.5 ลิตร เมื่อใช้กากมันสำปะหลัง 2% (Total solids) กระบวนการหมักสิ้นสุดที่ 44 วัน




**รูปที่ 3.26** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 (A) และ 50 (B) ลิตร




**รูปที่ 3.27** Volatile fatty acids ที่สะสมระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 (A) และ 50 (B) ลิตร




**รูปที่ 3.28** Alkalinity และ Volatile fatty acids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใช้ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เติมยูเรีย 0.04% ใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 20 (A) และ 50 (B) ลิตร

## 3.8 การสรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในระบบ Single-stage และประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ Two-stage digester

สรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง ในระบบ Single-stage digester ระดับห้องปฏิบัติการที่มีปริมาตรหมัก (working volume) สูงสุด 50 ลิตร มีผลสำเร็จที่ดี โดยที่การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังด้วยปริมาตรหมัก 50 ลิตร ได้เปรียบเทียบการใช้หัวมันสำปะหลัง 2 พันธุ์ คือ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11 มีแป้ง 25.56%) และพันธุ์ระยอง 5 (มีแป้ง 28.72% ซึ่งมากกว่าพันธุ์ CMR 35-22-196) พบว่าเมื่อผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 เตรียมเป็นชิ้นหัวมันแห้ง (ความชื้น 17.37%) ปริมาณ Total solids 1.0% ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) กิจกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์สิ้นสุดภายใน 38 วัน ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 313 ลิตร (หรือ 363 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้น 52%) เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น เท่ากับ 626 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ได้ก๊าซที่มีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุด 75.9% โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 21 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดเท่ากับ 52%

การศึกษาครั้งนี้ได้เติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0.25% (น้ำหนักต่อปริมาตร) จำนวน 4 ครั้ง ในสัปดาห์แรกของการหมัก ค่า pH ของวัสดุในถังหมัก ค่อนข้างคงที่ที่ pH 7-8 ตลอดกระบวนการหมัก จากผลการทดลองพบว่าระหว่างกระบวนการหมักที่ได้มีเทนเป็นส่วนประกอบมากกว่า 50% นั้น ค่า pH ของน้ำหมักอยู่ในช่วง 7.5-8.2 ในสภาวะการหมักที่ไม่มีการกวนอาจเกี่ยวข้องกับความไม่สม่ำเสมอของค่าวิเคราะห์ที่ได้รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุในถังหมัก

สำหรับการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 (ความชื้น 14.18%) ที่มีปริมาณแป้งสูงกว่าพันธุ์ระยอง 11 โดยใช้ Total solids 1.0% ในปริมาตรหมัก 50 ลิตร ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ 76% โดยปริมาตร เมื่อหมักเป็นเวลา 19 วัน ได้ก๊าซสะสม 304 ลิตร คิดเป็นปริมาณของมีเทน 185 ลิตร จากที่ค่าเฉลี่ยของมีเทนที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 61% โดยปริมาตร พบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($H_2S$) ในระบบหมักปริมาณน้อยมาก (ตรวจวัดได้ 298 ppm ที่ค่ามีเทนสูงสุด 76% โดยปริมาตร เมื่อหมักเป็นเวลา 19 วัน) อาจเนื่องจากสารอาหารในระบบหมักไม่ส่งเสริมการผลิตก๊าซดังกล่าว ค่า pH ของน้ำหมักโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.6-8.3 มีการปรับ pH ด้วยการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตในสัปดาห์แรกของการหมักเช่นกัน ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งหมด 608 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed (เทียบเท่า 340 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้น 56%) มีปริมาณมีเทน (ความเข้มข้นโดยเฉลี่ย 61% โดยปริมาตร) 340 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ดังนั้นสามารถทดลองปรับระบบเพื่อให้มีการผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และยังคงมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบมากกว่า 60% โดยทดลองเติมสารอาหารเพิ่มได้ตั้งแต่วันที่ 10 ของการหมัก แต่ถ้าต้องการความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบอย่างน้อย 70% สามารถทดลองเติมสารอาหารเพิ่มได้ตั้งแต่วันที่ 12 ของการหมัก ทั้งนี้ขึ้นกับประสิทธิภาพของเชื้อเริ่มต้น

สำหรับการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังนั้น เมื่อใช้กากมันแห้ง (ความชื้น 15.19%) ปริมาณที่เหมาะสม (Total solids 1.0%) ด้วย Single-stage digester ในปริมาตรหมัก 50 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส ขณะทดลองขั้นตอนนี้) พบการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วง 6.6-8.3 และให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 148 ลิตร เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น 296 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณมีเทนที่มีความเข้มข้น 56% เท่ากับ 165 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed องค์ประกอบก๊าซที่เป็นมีเทนสูงที่สุดคือ 75.4% ที่ระยะเวลาการหมัก 38 วัน ตามลำดับ หากใช้กากมันสำปะหลังสดที่มีความชื้น 83% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพ (ที่มีมีเทนไม่น้อยกว่า 56% โดยปริมาตร) ได้ 69 ลิตรต่อกิโลกรัม

จากการทดสอบการจุดติดไฟของก๊าซที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลังใน Single-state digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร พบว่าให้เปลวไฟสีน้ำเงินที่จัดได้ว่ามีองค์ประกอบของก๊าซพลังงานที่ดี (รูปที่ 3.29) รวมทั้งลักษณะน้ำหมักและกากตะกอนจากการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง เมื่อกระบวนการผลิตก๊าซสิ้นสุดแล้ว ทั้งของเหลว (มี pH ที่ค่อนข้างเป็นกลางถึงเป็นด่าง) และกากตะกอนมีความเป็นได้ที่จะใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ย (รูปที่ 3.29)

ด้านการประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ Two-stage digester นั้น ผลการศึกษาที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบหัวมันและกากสำปะหลังอาจไม่จำเป็นต้องปรับจาก Single-stage digester เป็นระบบ Two-stage digester เนื่องจากธรรมชาติของวัตถุดิบมีแป้งและเยื่อใยเป็นส่วนประกอบหลัก ที่จุลินทรีย์เฉพาะชนิดเท่านั้นที่สามารถใช้เป็นสารอาหารในการเจริญได้ ทางโครงการวิจัยได้เตรียมจุลินทรีย์ประเภทดังกล่าวข้างต้นให้มีความพร้อมในขั้นตอนการพัฒนา Seed culture เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้การย่อยสลายวัตถุดิบไม่เกิดกรดในปริมาณมากเกินไปและรวดเร็วมากจนทำให้ pH ของวัสดุหมักลดต่ำถึงขั้นยับยั้งการเจริญของ Methanogenic bacteria ดังเช่นที่มีรายงานกับวัตถุดิบมูลสัตว์และวัตถุดิบที่มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งตามที่มีรายงานประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนโดยใช้ Two-stage digester นี้สูงกว่า Single-stage digester เนื่องจากสามารถควบคุมสภาวะสำหรับ Non-methanogenic และ Methanogenic bacteria ได้ Two-stage digester เหมาะสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบที่มีความเป็นกรดและพวกของแข็ง (Punyawattoe, 1986; Carbone *et al.*, 2002)

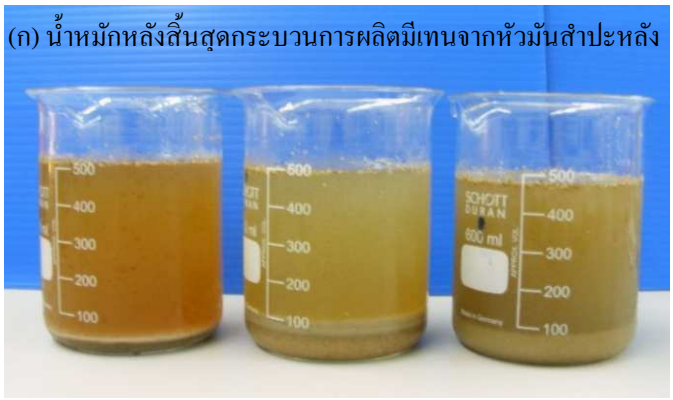
ตัวอย่างการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลังที่มีการปรับระบบหมัก ได้แก่ รายงานการศึกษาตาม Panichnumsin *et al*. (2012) ที่พยายามเพิ่มผลผลิตมีเทนในการผลิตที่ใช้กากมันสำปะหลังร่วมกับมูลสุกรเป็น Feedstock โดยใช้ระบบหมัก Two-phase anaerobic system ใน Two-phase continuously stirred tank reactor โดยช่วง Hydrolysis/Acidification อยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มี Active volume 0.5 ลิตร Hydraulic retention time (HRT) 2 วัน และ Methanogenic phase ในถังปฏิกรณ์ขนาดบรรจุ 5 ลิตร ที่มี Active volume 3 ลิตร และ HRT 13 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างกากมันสำปะหลังและมูลสุกรเท่ากับ 60:40 พบว่า Co-digestion ในถังหมัก Two-phase continuously stirred tank reactor ให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น 36% เมื่อเทียบกับการผลิตในถังหมัก Single-phase continuously stirred tank reactor

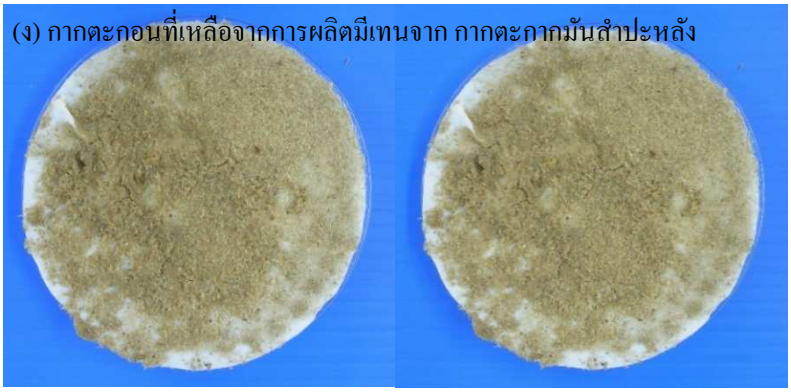
(ก) ถังหมักปริมาตร 50 ลิตร ชุดวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ และชุดทดสอบการจุดติดไฟ

(ข) ชุดวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ และชุดทดสอบการจุดติดไฟ

(ค) ชุดวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ และชุดทดสอบการจุดติดไฟ

**รูปที่ 3.29** ชุดวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ และชุดทดสอบการจุดติดไฟของก๊าซที่ได้จากการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลังใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 50 ลิตร






**รูปที่ 3.30** ลักษณะน้ำหมักและกากตะกอนจากการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลัง (ก และ ข) และกากมันสำปะหลัง (ค และ ง) ตามลำดับ เมื่อกระบวนการผลิตก๊าซสิ้นสุดแล้ว ทั้งของเหลวและกากตะกอนมีความเป็นได้ที่จะใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ย

# บทที่ 4

# บทสรุป

## 4.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งที่จะผลิตมีเทนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทน โดยใช้หัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง ที่สามารถดำเนินการวิจัยได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ ดังนี้ (1) ได้มีเทนที่มีศักยภาพสูงเพียงพอกับการใช้เป็นแหล่งพลังงาน จากหัวมันสำปะหลังดิบซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยที่ผลิตได้ปริมาณมากและจัดได้ว่ามีมูลค่าต่ำ และจากกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน (2) ได้วิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed cultures) และเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยแป้งมันสำปะหลังดิบและการผลิตมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง และ (3) ได้ข้อมูลด้านปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเพื่อการเพิ่มศักยภาพการผลิต ตามข้อมูลสรุปดังนี้

### 4.1.1 ผลผลิตมีเทนที่มีศักยภาพสูงเพียงพอกับการใช้เป็นแหล่งพลังงาน จากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง

วัตถุดิบหัวมันสำปะหลังสดได้จากพื้นที่เพาะปลูกและกากมันสำปะหลังจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา โดยหัวมันสำปะหลังที่รวบรวมได้มีอายุโดยเฉลี่ย 8 เดือน จำนวน 8 สายพันธุ์ คือ พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50, ห้วยบง 60, ระยอง 5, ระยอง 7, ระยอง 9, ระยอง 90, CMR 35-22-196 หรือระยอง 11 และ CMR 89 เพื่อเลือกหัวมันสำปะหลังพันธุ์ตัวแทนในการผลิตมีเทน เตรียมวัตถุดิบหัวมันสำปะหลังสดใช้ทั้งเปลือก ล้างด้วยน้ำสะอาด ผึ่งให้แห้ง หั่นหัวมันทั้งเปลือกนั้นให้มีขนาดประมาณ 0.2-1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร อบแห้งในตู้อบไอร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ให้มีความชื้นคงเหลือประมาณ 14-18% แล้วบดหยาบ เก็บบรรจุหัวมันแห้งที่บดแล้วในถุงพลาสติกปิดสนิทในตู้เย็น (อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) เพื่อใช้ศึกษาตลอดโครงการ สำหรับกากมันสำปะหลังเก็บรวบรวมจากแหล่งผลิตแป้งมันสำปะหลังได้จำนวน 6 ตัวอย่าง มีความชื้นสูง ปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 77-83% เน่าเสียได้ง่าย เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติ จึงเตรียมด้วยวิธีการอบแห้งเช่นเดียวกับหัวมันสำปะหลัง จากนั้นทดลองผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษาใน Single-stage digester ด้วยปริมาตรหมัก 5-50 ลิตร ดังนี้

#### 4.1.1.1 มีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลัง

ทดลองผลิตมีเทนให้ได้เป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ โดยใช้หัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ที่เตรียมในลักษณะแห้ง (ความชื้นโดยเฉลี่ย 17% และ Total

solids 83%) เป็นวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ชีวภาพปริมาตรวัสดุหมัก 20 และ 50 ลิตร ที่มีค่า Total solids 1.0% เติมยูเรีย 0.04% เป็นแหล่งไนโตรเจน ด้วยระบบ Single-stage digester ที่อุณหภูมิห้อง และใช้เชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ที่ได้จากการศึกษา ปริมาณ 10% โดยปริมาตร โดยไม่มีการกวนผสม ควบคุม pH ของน้ำหมักด้วยการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 0.25% โดยปริมาตร เมื่อพบอัตราส่วนของ Volatile fatty acids ต่อ Alkalinity มีค่ามากกว่า 0.8 ติดตามการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการหมักที่สิ้นสุด โดยสังเกตจากที่ไม่มีก๊าซที่สามารถตรวจนับปริมาณได้ เมื่อทดลองด้วยปริมาตรหมัก 20 ลิตร การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลัง ใช้เวลาผลิตก๊าซทั้งสิ้น 35 วัน ที่อุณหภูมิในช่วง 29-31 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพรวม 468 ลิตร ที่มีความเข้มข้นของมีเทน ($CH_4$) เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพสูงสุด 77% โดยปริมาตร และมีช่วงเวลาที่มีการผลิตก๊าซที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนคงที่ในช่วง 70-77% โดยปริมาตร เป็นเวลา 17 วัน ตั้งแต่หมักได้ 17 วัน จนถึงวันที่ 33 และสิ้นสุดกระบวนการหมักในวันที่ 35 เนื่องจากไม่มีการเติมหัวมันสำปะหลังหรือสารอาหารใดๆ เพิ่มให้จุลินทรีย์

การทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังด้วยปริมาตรหมัก 50 ลิตร ได้ทดลองเปรียบเทียบการใช้หัวมันสำปะหลัง 2 พันธุ์ คือ CMR 35-22-196 และพันธุ์ระยอง 5 ซึ่งมีปริมาณแป้งมากกว่าพันธุ์ CMR 35-22-196 พบว่าเมื่อผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) กิจกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์สิ้นสุดภายใน 38 วัน ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 313 ลิตร (หรือ 363 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้น 52%) เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น เท่ากับ 626 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบก๊าซพบว่ามีก๊าซมีเทนสูงที่สุดคือ 75.9% โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 21 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดเท่ากับ 52% โดยปริมาตร

ในกระบวนการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 นี้ มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.34-8.30 โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 8.30 และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 4 วันแรก โดยลงมาที่ค่า 6.34 และค่อยๆ เพิ่มจนมีค่า pH เท่ากับ 8.14 ที่วันสิ้นสุดการผลิตก๊าซชีวภาพ ค่า Volatile fatty acids อยู่ในช่วง 750-6,900 มิลลิกรัม (mg as acetate/L) ส่วน Alkalinity อยู่ในช่วง 1,400-5,800 มิลลิกรัม (mg as $CaCO_3$/L) อัตราส่วนระหว่างค่าความเป็นกรดไขมันมันระเหยต่อความเป็นด่างทั้งหมด (VFA/A) ที่เริ่มต้นการหมักเท่ากับ 0.54 และลดลงจนถึง 0.29 เมื่อสิ้นสุดระยะการหมัก ค่า VFA/A เป็นค่าช่วงที่มีรายงานว่าเหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังนี้ ปริมาณผลผลิตก๊าซสูงสุดในสัปดาห์แรกของการหมักเป็นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงมิได้สัมพันธ์กับความเข้มข้นของมีเทนที่สูง เมื่อทดลองผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังพันธุ์เดียวกันที่ขยายกำลังการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ พบปริมาณมีเทนโดยเฉลี่ยที่เป็นส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (50, 56 และ 52% ตามลำดับ) จากที่สามารถผลิตมีเทนได้ทั้งหมด 246, 262 และ 322 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed สำหรับปริมาตรหมัก 5, 20 และ 50 ลิตร ตามลำดับ

เมื่อเริ่มเติมวัตถุดิบลงในถังหมัก จุลินทรีย์ในกลุ่ม Acid-forming bacteria เจริญอย่างรวดเร็วเกิดสภาวะกรดซึ่งมีผลลดการเจริญของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) และกระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) การรักษาค่า pH ให้ใกล้เคียงกับ pH ที่เป็นกลางกระทำได้โดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อเพิ่มความเป็นด่างในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ การศึกษาครั้งนี้ได้เติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0.25% (น้ำหนักต่อปริมาตร) จำนวน 4 ครั้ง ในสัปดาห์แรกของการหมักในทุกขนาดบรรจุของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ จากนั้นค่า pH ของวัสดุในถังหมักค่อนข้างคงที่ที่ pH 7-8 ตลอดกระบวนการหมัก

สำหรับการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 ความชื้น 14.18% ที่มีปริมาณแป้งสูงกว่าพันธุ์ระยอง 11 ในปริมาตรหมัก 50 ลิตร ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ 76% โดยปริมาตร เมื่อหมักเป็นเวลา 19 วัน ได้ก๊าซสะสม 304 ลิตร คิดเป็นปริมาณของมีเทน 185 ลิตร จากที่ค่าเฉลี่ยของมีเทนที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 61% โดยปริมาตร

ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพราว 77% โดยปริมาตร ในวันที่ 3 ของการหมัก จากนั้นจะลดลงเป็นลำดับเมื่อระยะเวลาหมักนานขึ้น ทำนองเดียวกับการสะสม Volatile fatty acids และเป็นสัดส่วนผกผันกับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีของการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน

อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากการทดลองหมักครั้งนี้ในช่วง 38 วัน อยู่ในช่วง 29-31 องศาเซลเซียส จากการทิ้งให้การหมักเกิดที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำหมัก (Slurry) โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.6-8.3 มีการปรับ pH ด้วยการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตในสัปดาห์แรกของการหมัก พบสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) อยู่ในช่วง 1,400-5,800 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L as $CaCO_3$) ปริมาณ Volatile fatty acids อยู่ในช่วง 750-6,900 มิลลิกรัม (mg/L as acetate) และอัตราส่วนของ Volatile fatty acids ต่อ Alkalinity ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 0.8 ซึ่งค่าที่ตรวจพบระหว่างกระบวนการหมักเหล่านี้อยู่ในช่วงที่มีการรายงานถึงการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดี กรดอินทรีย์ที่เป็น Volatile fatty acids (VFA) พบว่า Acetic acid เป็นผลผลิตหลัก ปริมาณ VFA ที่ตรวจพบหมดไปเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก

ปริมาณ Total solids ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการผลิตมีเทน ไม่ได้วิเคราะห์เนื่องจากผลการวิจัยพื้นฐานของผู้วิจัยพบการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงยังมีโครงสร้างของเยื่อใยที่แข็งแรง ย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ยาก คงเหลือในปริมาณใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการหมัก ส่วนปริมาณแป้งที่วิเคราะห์ในรูปของน้ำตาลลดลงอย่างรวดเร็วสัมพันธ์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

การผลิตมีเทนปริมาตร 50 ลิตร ที่ใช้หัวมันสำปะหลังดิบพันธุ์ระยอง 5 ทำแห้งทั้งเปลือก ความชื้น 14.18%) นี้ เพิ่มการตรวจหาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($H_2S$) ที่ตรวจพบในระบบหมักปริมาณน้อยมาก (ตรวจวัดได้ 298 ppm ที่ค่ามีเทนสูงสุด 76% โดยปริมาตร เมื่อหมักเป็นเวลา 19 วัน) อาจเนื่องจากสารอาหารในระบบหมักไม่ส่งเสริมการผลิตก๊าซดังกล่าว

มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งหมด 608 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed (340 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้น 56%) มีปริมาณมีเทน (ที่มีความเข้มข้นโดยเฉลี่ย 61%) 340 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ดังนั้นในการทดลองปรับระบบเพื่อให้มีการผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและยังคงมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบมากกว่า 60% สามารถทดลองเติมสารอาหารเพิ่มได้ตั้งแต่วันที่ 10 ของการหมัก แต่ถ้าต้องการความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบอย่างน้อย 70% สามารถทดลองเติมสารอาหารเพิ่มได้ตั้งแต่วันที่ 12 ของการหมัก ทั้งนี้ขึ้นกับประสิทธิภาพของเชื้อเริ่มต้น

**4.1.1.2 มีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง**

จากผลการศึกษาปริมาณของกากมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 15.19%) ที่เหมาะสม (แหล่งคาร์บอน) คือ Total solids 1.0% เพื่อผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ ปริมาณมีเทน และปริมาณของแป้ง จากการทดลองผลิตมีเทนในปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส ขณะทดลองขั้นตอนนี้) พบการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วง 6.8-8.2 และ 6.6-8.3 Volatile fatty acids อยู่ในช่วง 420-7,050 และ 750-4,800 มิลลิกรัม (mg as acetate/L) ส่วน Alkalinity อยู่ในช่วง 1,420-8,720 และ 1,400-8,600 มิลลิกรัม (mg as $CaCO_3$/L) อัตราส่วนระหว่างค่าความเป็นกรดไขมันมันระเหยต่อความเป็นด่างทั้งหมด เริ่มต้นการหมักเท่ากับ 0.30 และเพิ่มขึ้นในช่วงต้นการหมักและค่อยๆลดลงจนถึง 0.20 เมื่อสิ้นสุดระยะการหมัก ส่วนปริมาตรหมักที่ 50 ลิตร มีค่าเท่ากับ 0.54 และลดลงจนมีค่าเท่ากับ 0.21 เมื่อสิ้นสุดการหมักเช่นเดียวกัน

Volatile fatty acids มีความเข้มข้นของ Acetic, Propionic และ Butyric acids ที่ปริมาตรหมัก 20 ลิตร อยู่ในช่วง 0-1,385, 0-1,056.69 และ 0-1,141.66 และที่ปริมาตรหมัก 50 ลิตร อยู่ในช่วง 60.82-2,975.48, 244.72-3,019 และ 0-2,714.22 ppm ตามลำดับ Acetic acid ในช่วงแรกของการหมัก มีความเข้มข้นสูงและค่อยๆลดลงเมื่อสิ้นสุดระยะการหมัก เนื่องจากมีการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมีเทน

ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากปริมาตรหมัก 20 และ 50 ลิตร ทั้งสิ้น 59 และ 148 ลิตร ตามลำดับ เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น 293 และ 296 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณมีเทนที่มีความเข้มข้น 57 และ 56% เท่ากับ 167 และ 165 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ได้มีเทนที่เป็นองค์ประกอบก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ 72.6% ที่ระยะเวลาการหมัก 35 วัน และ 75.4% ที่ระยะเวลาการหมัก 38 วัน ตามลำดับ หากใช้กากมันสำปะหลังสดที่มีความชื้น 83% สามารถผลิตก๊าชชีวภาพที่มีมีเทนไม่น้อยกว่า 56% โดยปริมาตร ได้ 69 ลิตรต่อกิโลกรัม

**4.1.2 วิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้น (Seed cultures) และเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยแป้งมันสำปะหลังดิบและการผลิตมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง**

วิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้นมีความสำคัญต่อการใช้ประโยชน์จุลินทรีย์เฉพาะชนิด/กลุ่มเพื่อผลิตมีเทนจากแป้ง (แป้งดิบ) จากหัวมันและกากมันสำปะหลัง ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จากที่เริ่มเตรียม Seed culture จากการใช้มูลไก่ กากน้ำตาล และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน

สำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา ในสัดส่วน มูลไก่ 100 กรัมต่อลิตร กากน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร น้ำทิ้งจากโรงงาน 25 หรือ 50 ลิตร ผสมในถังบรรจุน้ำมีฝาปิดขนาดบรรจุปริมาตรประมาณ 50 หรือ 100 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยการเติมน้ำสะอาดหรือน้ำประปาให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 50 หรือ 100 ลิตร เก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 เดือน ในทุกสัปดาห์ระหว่างเก็บเติมกากน้ำตาล 1.0 กรัมต่อลิตร และหัวมันสำปะหลังบด 2.5 กรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากัน ปรับค่า pH ของส่วนผสม Seed culture ให้ได้ pH ประมาณ 6.8 ด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และพัฒนาได้กรรมวิธีการเตรียมเชื้อเริ่มต้นจากที่ทดลองจำนวน 6 ชุดการทดลอง ขั้นตอนที่เหมาะสมได้จากการใช้น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังที่เจือจางลง 1 เท่า เติมมูลไก่ 100 กรัมต่อลิตร บ่มในถังมีฝาปิดที่พอระบายก๊าซที่เกิดขึ้นได้ และมีการเติมแป้งจากหัวมันสำปะหลังดิบที่เตรียมในรูปวัตถุดิบแห้งเพื่อใช้ทดลองผลิตมีเทนปริมาณ 0.02% (น้ำหนักโดยปริมาตร) ทุกๆ 3 วัน ในช่วง 1 เดือนแรก พร้อมทั้งควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 5-7 ด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ติดตามการเปลี่ยนแปลงของของเหลวเป็นเวลา 3 เดือน จากนั้นเติมกากน้ำตาล 1.0 กรัมต่อลิตร และแป้งจากหัวมันสำปะหลัง 2.5 กรัมต่อลิตร ในทุก 2 สัปดาห์ สังเกตจากลักษณะปรากฏของเชื้อเริ่มต้นที่ว่องไวในการใช้ผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง ควรมีฟองก๊าซที่ผิวหน้าของเหลว ปรับค่า pH ของของเหลวให้อยู่ประมาณ 6.8 เชื้อเริ่มต้นที่มีอายุ 2 เดือนขึ้นไป สามารถนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลังอย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาตรเชื้อเริ่มต้นที่นำออกจากถังเลี้ยงไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพไม่เกิน 10 ลิตรต่อครั้ง สามารถเติมน้ำประปาหรือน้ำสะอาดลงไปทดแทนได้ หากมีการใช้ต่อครั้งมากกว่า 10 ลิตร ทดแทนปริมาตรด้วยการเติมน้ำทิ้งจากบ่อพักแรกของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง เจือจางเท่าตัวด้วยน้ำประปาหรือน้ำสะอาด

**4.1.3 ข้อมูลด้านปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง**

ข้อมูลด้านปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเพื่อการเพิ่มศักยภาพการผลิต

**4.1.3.1 ส่วนประกอบด้านธาตุอาหารของจุลินทรีย์จากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง**

หัวมันสำปะหลังจัดเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายและยังคงจัดได้ว่ามีมูลค่าต่ำ เมื่อนำมาวิเคราะห์หาส่วนประกอบกายภาพทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับธาตุอาหารสำหรับจุลินทรีย์ พบว่าหัวมันสำปะหลังดิบทั้งเปลือกอายุในช่วงประมาณ 8 เดือน จำนวน 8 สายพันธุ์ (พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50, ห้วยบง 60, ระยอง 5, ระยอง 7, ระยอง 9, ระยอง 90, CMR 35-22-196 หรือระยอง 11 และ CMR 89) ที่ปลูกในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา มีส่วนประกอบทางกายภาพและเคมีที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักกล่าวคือ มีปริมาณความชื้น 51-68% มีแป้ง 25-33% ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด 32-40% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.06-1.04% ฟอสฟอรัส 0.04-0.11% และโพแทสเซียม 0.28-0.72% จากนั้นได้เลือกหัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 หรือระยอง 11 เนื่องจากมีส่วนประกอบด้านธาตุอาหารในปริมาณที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบของหัวมันสำปะหลังอีก 7 สายพันธุ์ และเป็นพันธุ์ที่หาหัวมันได้ง่ายในพื้นที่

จังหวัดนครราชสีมาในช่วงเวลาที่ศึกษา เพื่อทดลองใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพ หัวมันสำปะหลังพันธุ์ดังกล่าวได้นำไปเตรียมเป็นหัวมันแห้งบดหยาบที่วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น 17.34% ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) 82.66% และ Volatile solids 98.54%

กากมันสำปะหลังที่ใช้ศึกษาได้จากกระบวนการเตรียมแป้งจากหัวมันสำปะหลังของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา 2 โรงงาน ที่เก็บรวบรวมจำนวน 6 ตัวอย่าง เมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางกายภาพและเคมี พบว่ามีปริมาณความชื้นในช่วง 77-83% pH 3.9-5.0 มีแป้ง 24-44% ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด 31-49% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.15-0.29% ฟอสฟอรัส 0.02% และโพแทสเซียม 0.24% จากนั้นเลือกกากมันหนึ่งตัวอย่างเพื่อเตรียมตัวอย่างแห้ง ซึ่งกากมันสำปะหลังแห้งที่เตรียมได้มีความชื้น 15.19% มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) 84.46% และ Volatile solids 97.37% สำหรับการทดลองผลิตมีเทน

**4.1.3.2 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพ**

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ในการหมักเพื่อผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพ จากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง มีขนาดบรรจุที่ใช้ปริมาตรหมัก 5-50 ลิตร กรณีถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ปริมาตรหมักน้อยกว่า 50 ลิตร มี 3 ขนาด คือ 5, 10 (ทดแทนถังขนาด 5 ลิตร ซึ่งชำรุดหลังการใช้งานต่อเนื่องกันและไม่สามารถจัดหาใหม่ได้ในช่วงการดำเนินงานของโครงการ) และ 20 ลิตร เป็นถังพลาสติกแข็งทรงสี่เหลี่ยม ความกว้าง 10, 13 และ 18 เซนติเมตร ความยาว 20, 26 และ 30 เซนติเมตร และความสูง 25, 30 และ 40 เซนติเมตร ขนาดบรรจุ 7.50, 10.14 และ 21.60 ลิตร ตามลำดับ มีสายยางซิลิโคนเชื่อมต่อถังหมักกับอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาตรของก๊าซที่ผลิตได้ (Gas counter) ด้วยหลักการแทนที่น้ำ โดยน้ำที่บรรจุใน Gas counter เป็นน้ำกลั่นที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เพื่อหลีกเลี่ยงการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ สำหรับถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ในการหมักปริมาตรหมัก 50 ลิตร เป็นถังสแตนเลสทรงกระบอกจากการจัดสร้างในห้องปฏิบัติการเพื่อการวิจัยและการเรียนการสอน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร มีขนาดบรรจุ 56.50 ลิตร

**4.1.3.3 วิธีการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังโดยคำนึงถึงปัจจัยด้านสารอาหาร**

ผลิตมีเทนให้ได้เป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบ โดยใช้หัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ที่ปลูกโดยทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา และหาได้ง่ายในช่วงดำเนินการโครงการนี้ เตรียมหัวมันเป็นชิ้นในลักษณะแห้ง วิเคราะห์ได้ความชื้นโดยเฉลี่ย 17.34% และ Total solids 82.66% เป็นวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ชีวภาพปริมาตรวัสดุหมัก 5 ลิตร ที่มีค่า Total solids 1.0% (จากผลการวิจัยเบื้องต้น) มีปริมาณแป้งที่วิเคราะห์ได้โดยเฉลี่ยราว 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยระบบ Single-stage digester ที่อุณหภูมิห้อง (23-27 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) และใช้เชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ชุดการทดลองที่ 1 ปริมาณ 10% (ปริมาตรต่อปริมาตร) พบว่ากระบวนการหมักสิ้นสุดที่ 21 วัน และได้ก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดคือ 19.24 ลิตร เทียบเท่า

ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 385 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีเทนเข้มข้นสูงสุดโดยเฉลี่ย (62%) ในวันที่ 16 ของการหมัก

สำหรับการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง ได้ทดลองผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลังด้วยการประมาณวัสดุหมักเริ่มต้นจากผลการทดลองหมักที่ได้จากการใช้หัวมันสำปะหลังดิบ ด้วยระบบ Single-stage digester ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร (ทดแทนถังหมักปริมาตร 5 ลิตร ที่ชำรุดและไม่สามารถหาทดแทนได้ในช่วงการศึกษาของโครงการนี้) ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) และใช้เชื้อเริ่มต้นจากที่พัฒนาได้ ปริมาณ 10% โดยปริมาตร ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณน้อย โดยได้ปริมาณก๊าซทั้งหมด 16.85 ลิตร จาก Total solids 1.0% และหมักจนสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งใช้เวลา 21 วัน เทียบเท่าผลผลิตก๊าซชีวภาพ 168.50 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed และความเข้มข้นของมีเทนสูงสุด 50% ในวันที่ 13-20 ของการหมัก จัดได้ว่าเป็นความเข้มข้นที่ต่ำเมื่อเทียบกับการใช้หัวมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซ

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง คือ สารอาหารที่เป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบและที่จำเป็นต้องเติมลงไปในระบบหมัก จุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้สารอาหารเหล่านี้ในการเจริญและสร้างผลผลิตก๊าซเป้าหมาย โดยคำนึงถึงสัดส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N ratio) ความเป็นด่าง (Alkalinity) และ pH ของน้ำหมัก ได้ผลโดยสรุปดังนี้

**1) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลัง**

ปริมาณหัวมันสำปะหลังที่เหมาะสม ใช้หัวมันสำปะหลังพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือพันธุ์ระยอง 11) ชุดที่นำมาทดลองผลิตมีเทนในโครงการนี้มีค่าเฉลี่ยของคาร์บอนและไนโตรเจนต่างกันราว 120 เท่า สัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักก๊าซชีวภาพตามที่มีรายงานควรประมาณ 20-30:1 จึงสามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ในการศึกษาครั้งนี้จึงทดลองหมักที่ปริมาตร 5 ลิตร ใช้วัตถุดิบหัวมันสำปะหลังดิบเตรียมในรูปมันแห้ง (ความชื้น 17.34%) ที่มีค่า Total solids แตกต่างกัน คือ 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00 และ 16.00% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และทดลองเติมยูเรีย (มีไนโตรเจน 46.7%) เป็นแหล่งไนโตรเจนปริมาณ 0.04% (จากผลการศึกษาเบื้องต้นของผู้วิจัย) ลงในวัสดุหมัก พบว่าปริมาณ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดปริมาณ 27 ลิตร เทียบเท่าผลผลิตก๊าซชีวภาพ 540 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ผลผลิตก๊าซ 1.98 ลิตรต่อวัน ที่มีมีเทนเข้มข้นสูงสุดที่ตรวจพบ 66% ในวันที่ 9 ของการหมัก และการหมักสิ้นสุดภายใน 17 วัน

จากนั้นได้ทดลองเพิ่มปริมาตรหมัก ผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพเป็นปริมาตรหมัก 20 ลิตร ด้วย Total solids 1% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่าได้ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเพิ่มเป็น 93.68 ลิตร เทียบเท่าผลผลิตก๊าซ 468.40 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ความเข้มข้นของมีเทนสูงสุดมากกว่า 60% (ได้ความเข้มข้น 62.5%) ในวันที่ 14 ของการหมัก และมีความเข้มข้นสูงสุด 76% (ปริมาตรก๊าซชีวภาพ 1.0-2.4 ลิตรต่อวัน) ในช่วงวันที่ 23-28 ของการหมัก นำผลที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ไป

ทดลองหาชนิดและปริมาณแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบ

ชนิดและปริมาณของแหล่งไนโตรเจน เมื่อใช้หัวมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 17.34%) ในปริมาณ Total solids ปริมาณ 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) จึงเลือกเลือกใช้แหล่งไนโตรเจนต่างกันคือ ยูเรีย (มีไนโตรเจน 46.7%) แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$ มีไนโตรเจน 21.0%) และโพแทสเซียมไนเตรท ($KNO_3$ มีไนโตรเจน 13.9%) ในปริมาณที่คำนวณให้ได้สัดส่วนของ C:N ในช่วง 20-30:1 เพื่อผลิตมีเทนด้วยปริมาตรหมัก 20 ลิตร เมื่อเติมยูเรียปริมาณ 0.40 กรัมต่อลิตร (0.04%) ให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพ 486.40 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นทั้งหมด 93.68 ลิตร ที่ใช้เวลา 35 วัน จึงสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุด 76% โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 23-28 วัน

เมื่อเติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.88 กรัมต่อลิตร (0.088%) ให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพ 350.90 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 70.18 ลิตร ที่ใช้เวลา 35 วัน จึงสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซ และมีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด 77% โดยปริมาตร ในวันที่ 28-34 ของการหมัก

กรณีเติมโพแทสเซียมไนเตรทปริมาณ 1.42 กรัมต่อลิตร (0.142%) ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 519.55 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed มีปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 103.91 ลิตร จากที่ใช้เวลา 35 วัน จึงสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และมีปริมาณมีเทนสูง 70-80% โดยปริมาตร เมื่อหมักได้ 16-28 วัน

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุหมักเป็นกลางถึงด่างเมื่อเติมแหล่งไนโตรเจนต่างกัน คือ ยูเรีย แอมโมเนียมซัลเฟต และโพแทสเซียมไนเตรท อยู่ในช่วง 6.51-8.51, 6.21-8.46 และ 6.42-8.56 ตามลำดับ ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 4 วันแรกของการหมัก จึงมีการปรับ pH ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต 0.25% เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวข้างต้น และ pH ค่อยเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของการหมัก ตามลำดับ

จากการศึกษาชนิดของแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อพิจารณาถึงปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ ปริมาณมีเทน และปริมาณและราคาของสารแหล่งไนโตรเจน แม้โพแทสเซียมไนเตรทให้ผลการผลิตมีเทนและก๊าซชีวภาพในภาพรวมดีกว่าการใช้ยูเรีย (ให้ผลดีกว่าแอมโมเนียมซัลเฟต) และแอมโมเนียมซัลเฟต (ให้ผลด้อยที่สุด) ก็ตาม แต่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมากกว่าอีกสองแหล่งไนโตรเจนข้างต้น เนื่องจากโพแทสเซียมไนเตรทมีธาตุไนโตรเจนเพียง 13.9% ในขณะที่ยูเรียและแอมโมเนียมซัลเฟตมีธาตุไนโตรเจน 46.7 และ 21.0% ตามลำดับ อีกทั้งมีราคาสูง (ราคาต่อ 500 กรัม เท่ากับ 450, 300 และ 290 บาท สำหรับโพแทสเซียมไนเตรท แอมโมเนียมซัลเฟต และยูเรีย ตามลำดับ ที่จัดซื้อมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้) รวมถึงยูเรียยังสามารถหาซื้อได้ในระดับปุ๋ยยูเรีย ซึ่งน้ำหนักกระสอบ 50 กิโลกรัม มีราคา ณ ปัจจุบันราว 650 บาท จึงเลือกใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยใช้หัวมันสำปะหลังแห้งที่ Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และทดลองเติมยูเรียในปริมาณ 0.02-0.20% (น้ำหนักต่อ

ปริมาตร) ผลการศึกษาพบว่าการเติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ลงในหัวมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 17.34%) ที่ Total solids 1.0% ยังคงให้ผลการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพดีที่สุด

**2) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง**

ใช้เชื้อเริ่มต้นที่พัฒนาได้ ปริมาณ 10% (โดยปริมาตร) ศึกษาปริมาณกากมันสำปะหลัง (แหล่งคาร์บอน) ที่เหมาะสม ทดลองหมักก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง (แหล่งคาร์บอน) ด้วยปริมาตรหมัก 10 ลิตร ด้วยระบบ Single-stage digester ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองขั้นตอนนี้) โดยใช้กากมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 15.19%) Total solids 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่เพิ่มแหล่งไนโตรเจนโดยเติมยูเรีย 0.04% พบว่าปริมาณ Total solids ในช่วง 1.0-2.0% ให้ผลการผลิตมีเทนอยู่ในช่วงที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ ความเข้มข้นของมีเทนสูงสุดเมื่อใช้ Total solids 0.5. 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) คือ 53.0, 63.6, 69.7, 71.0 และ 60.6% ที่ระยะเวลาการหมัก 21, 19, 20, 21 และ 20 วัน ตามลำดับ ส่วนที่ Total solids 4.0% นั้น ปริมาณก๊าซมีเทนจะสูงสุดที่ 38.7% เท่านั้น การใช้กากมันสำปะหลังในปริมาณ Total solids 1.0% มีแนวโน้มการใช้วัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้มีประสิทธิภาพ สังเกตจากที่ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพราว 440 ลิตรต่อกิโลกรัม Total solids fed ที่สูงกว่าปริมาณ Total solids อื่นที่ทดลองในปริมาตรหมัก 10 ลิตร

ด้านชนิดและปริมาณของแหล่งไนโตรเจน เลือกกากมันสำปะหลังแห้ง (ความชื้น 15.19%) ที่ Total solids 1.0% เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของแหล่งไนโตรเจนที่ควรเติมลงในระบบหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน โดยชนิดของแหล่งไนโตรเจนที่ประมาณการณ์จากปริมาณแป้งด้วยสัดส่วนตามที่ทดลองสำเร็จจากการใช้หัวมันสำปะหลัง คือเติมยูเรีย 0.04% หรือแอมโมเนียมซัลเฟต 0.088% หรือโพแทสเซียมไนเตรท 0.142% พบว่าการเติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนในปริมาณ 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ให้ผลการผลิตมีเทนดีที่สุด

ปริมาณ (ความเข้มข้น) ของแหล่งไนโตรเจน จากผลการศึกษา ยูเรียยังคงเป็นแหล่งไนโตรเจนที่ดีสำหรับใช้ในการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลัง เช่นเดียวกับจากหัวมันสำปะหลัง จึงทดลองผลิตด้วยปริมาตรหมัก 10 ลิตร ที่ใช้ปริมาณ Total solids 1.0% เติมยูเรียในช่วง 0.02-0.08% (น้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดในช่วง 55-64% โดยปริมาตร ซึ่งการเติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนในปริมาณ 0.04% ลงในกากมันสำปะหลัง ยังคงให้ผลการผลิตมีเทนดีที่สุด

**4.1.3.4 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในระบบ Single-stage และความเป็นไปได้ในการใช้**

**Two-stage digester**

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง ในระบบ Single-stage digester ระดับห้องปฏิบัติการที่มีปริมาตรหมักสูงสุด 50 ลิตร มีผลสำเร็จที่ดี ดังระบุข้างต้น (ข้อ 4.1.1) ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากหัวมันและ

กากมันสำปะหลังปริมาตรหมัก 50 ลิตร จุดติดไฟที่ให้เปลวไฟสีน้ำเงินที่จัดได้ว่ามีองค์ประกอบของก๊าซพลังงานที่ดี รวมทั้งลักษณะน้ำหมักและกากตะกอนจากการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันและกากมันสำปะหลัง เมื่อกระบวนการผลิตก๊าซสิ้นสุดแล้ว ทั้งของเหลว (มี pH ที่ค่อนข้างเป็นกลางถึงเป็นด่าง) และกากตะกอนมีความเป็นได้ที่จะใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ย เมื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ Two-stage digester ผลการศึกษาที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบหัวมันและกากสำปะหลังอาจไม่จำเป็นต้องปรับจาก Single-stage digester เป็นระบบ Two-stage digester เนื่องจากธรรมชาติของวัตถุดิบมีแป้งและเยื่อใยเป็นส่วนประกอบหลัก ที่จุลินทรีย์เฉพาะชนิดเท่านั้นที่สามารถใช้เป็นสารอาหารในการเจริญได้ ทางโครงการวิจัยได้เตรียมจุลินทรีย์ประเภทดังกล่าวข้างต้นให้มีความพร้อมในขั้นตอนการพัฒนา Seed culture เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้การย่อยสลายวัตถุดิบไม่เกิดกรดในปริมาณมากเกินไปและรวดเร็วมากจนทำให้ pH ของวัสดุหมักลดต่ำถึงขั้นยับยั้งการเจริญของ Methanogenic bacteria ดังเช่นที่มีรายงานกับวัตถุดิบมูลสัตว์และวัตถุดิบที่มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลัก

**4.2 ข้อเสนอแนะ**

โครงการวิจัยนี้มีผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาต่อในเชิงลึกในส่วนที่เกี่ยวข้องในประเด็นดังต่อไปนี้

1) การทดลองเพิ่มกำลังการผลิตเชื้อเริ่มต้น (Seed culture) ด้วยระบบถังปฏิกรณ์ควบคุมสภาวะ

2) การพัฒนาวิธีการและขยายกำลังการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพให้ได้ปริมาณก๊าซเพียงพอต่อการใช้อย่างน้อยในระดับครัวเรือน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บรรณานุกรม


กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2547. ก๊าซชีวภาพ. คลังความรู้, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน. [ออนไลน์]. ได้มาจาก: http://www.dede.go.th

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2552. พลังงานก๊าซชีวภาพ. คลังความรู้, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน. [ออนไลน์]. ได้มาจาก: http://www.dede.go.th

ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย. 2549. สถานการณ์มันสำปะหลังปีการผลิต 2549/50. *รายงานผลการสำรวจภาวะการผลิตและการค้ามันสำปะหลังของไทยปีการผลิต 2549/50*. ส่วนวิเคราะห์ธุรกิจ ฝ่ายวิชาการ, EXIM Thailand: Export-Import Bank of Thailand. ตุลาคม 2549. 2 หน้า.

นริศรา สิทธิวงศ์ วิราวรรณ ภูล้นแก้ว แก้วตา สูตรสุวรรณ และ ลิขิต ศิริสันติเมธาคม. 2552. การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง. *แบบรายงานการวิจัย UGP 10*. กาฬสินธุ์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตกาฬสินธุ์. 6 หน้า.

สำนักข่าว INN: Independent News Network. 2556. เอกชนแนะเกษตรกรเพิ่มคุณภาพมันสำปะหลัง. ข่าวเศรษฐกิจ. วันเสาร์ที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2556.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2556. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555. เอกสารสถิติการเกษตร เลขที่ 402. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. นนทบุรี: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด สาขา 4. 174 หน้า.

หนังสือพิมพ์ ผู้จัดการออนไลน์. 2546. โครงการผลิตก๊าซชีวภาพ. [On-line]. Available: http://www.manager.co.th/asp-bin/Viewnews.asp/ News ID=4616108071207. 12 มิถุนายน 2546.

Aiman, S., Lindajati, T., and Milono, P. 1981. Biogas production from tapioca processing solid waste. *Proceedings of the 1st ASEAN Seminar-Workshop on Biogas Technology*, *Working Group on Food Waste Material 1981*, *Manila*, *Philipines*: 36-51.

Alaa El-Din, M.N., Gomma, H.A., El-Shimi, S.A., and Ali, B.E. 1984. Biogas production from kitchen refuses of army camps of Egypt using a two stage biogas digester. *In* EL-Halwagi, M.M. (ed.). *Biogas Technology*: *Transfer and Diffusion*. New York: Elsevier Applied Science. pp. 589-599.

American Public Health Association. 1990. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th edition. American Public Health Association, Washington, D.C., U.S.A.

Anunputtikul, W. 2004. Biogas production from cassava tubers. M.Sc. Thesis. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology.

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.

Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International. 2000. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 17th Edition. Gaithersburg: AOAC International.

Bardiya, N., Somayaji, D., and Khanna, S. 1996. Biomethanation of banana peel and pineapple waste. *Bioresource Technology.* 58: 73-76.

Bhumiratana, S., Tanticharoen, M., Putamayothin, N., and Supajunya, N. 1984. Biogas technology in Thailand. *Proceedings of the 2nd ASEAN Workshop on Biogas Technology Applied to the Management and Utilization of Food Waste Materials 1984*, *Kuala Terengganu*, *Malaysia*: 104-110.

Biomass information. 2003. Biomass [On-line]. Available: http://www.efe.or.th/resource biomass.htm

Bitton, G. 1994. *Wastewater Microbiology*. New York: A John Wiley and Sons.

Bunchueydee, P. 1984. Industrial biogas: A feasibility study of waste utilization from agro-industry in Thailand. *Renewable Nonconventional Energy Project*, *Royal Thai Government and United States Agency for International Development (USAID) 1984* (pp. 1-137). Bangkok: Ministry of Science, Technology and Energy.

Calzada, J.F., De Porres, E., Yurrita, A., De Arriola, M.C., De Micheo, F., Rolz, C., and Menchu, J.F. 1984. Biogas production from coffee pulp juice: One- and two-phase systems. *Agricultural Wastes*. 9: 217-230.

Carbone, S.R., Dasilva, F.M., Tavares, C.R.G., and Filho, B.P.D. 2002. Bacterial population of a two-phase anaerobic digestion process treating effluent of cassava starch factory. *Environmental Technology*. 23: 591-597.

Charles, A.L., Sriroth, K., and Huang, T.-C. 2005. Proximate composition, mineral contents, hydrogen cyanide and phytic acid of 5 cassava genotypes. *Food Chemistry*. 92: 615-620.

Charoensuwan, K. Tanticharoen, M., Panichnumsin, P., and Chaiprasert, P. 2002. Effect of the sulphate rich wastewater on the performance of anaerobic treatment systems. *Abstracts of the 14th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology*, *12-15 November 2002*, *Khon Kaen*, *Thailand*: 85.

Cohen, T. 2004. Waste to energy: A waste solutions success in Thailand. *Refocus*. 5(5): 26-28.

Cuzin, N., Farinet, J.L., Segretain, C., and Labat, M. 1992. Methanogenenic fermentation of cassava peel using a pilot plug flow digester. *Bioresource Technology*. 41: 259-264.

Deublein, D. and Steinhauser, A. 2008. B*iogas from Waste and Renewable Resources*: *An Introduction*. Weinheim: Wiley-VCH.

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.

Energy Policy and Planning Office. 2002. Biogas production from animal manure [On-line]. Available: http://www. eppo.go.th/div2/gas.htm

Energy Policy and Planning Office. 2003. Biogas production in animal farm [On-line]. Available: http://www. eppo.go.th/vrs/VRS38-10-Biomass.html/gas.htm

Energy Policy and Planning Office. 2005. โครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพ [On-line]. Available: http://www.eppo.go.th/div/2gas.htm 03/02/2005

Filípek, J and Dvorák, R. 2009. Determination of volatile fatty acid content in the rumen liquid: Comparidon of gas chromatography and capillary isotachophoresis. *Journal of the University of Veterinary and Pharmaceutical Sciences in Brno*. 78: 627-633.

Gales, P.W. 1990. Malt beverages and brewing materials. In: *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, AOAC, 15th edition, The Association of Official Analytical Chemists, Inc., Arlington, U.S.A., pp. 708-715.

George, T and Franklin, L.M. 1991. *Wastewater Engineering*: *Treatment*, *Disposal*, *and Reuse*, (3rd edition). New York: McGraw-Hill.

Grace, M.R. 1998. *Cassava Processing*. FAO Plant Production Series No. 3.

Graef, S.P. and Andrews, J.F. 1974. Stability and control of anaerobic digestion. *Journal of the Water Pollution Control Federation*. 4: 666-683.

Haga, K., Tanaka, H., and Higaki, S. 1979. Methane production from animal waste and its prospects in Japan. *Agricultural Wastes*: 45-55.

Hobson, P.N. and Wheatly, A.D. 1993. *Anaerobic Digestion*: *Theory and Practice*. London: Elsevier Science.

Imam, M.F.I.A., Khan, M.Z.H., Sarkar, M.A.R., and Ali, S.M. 2013. Development of biogas processing from cow dung, poultry waste, and water hyacinth. *International Journal of Natural and Applied Science*. 2(1): 13-17.

Kalia,V.C., Sonakya, V., and Raizada, N. 2000. Anaerobic digestion of banana stem waste. *Bioresource Technology*. 73: 191-193.

Kimyong, C., Nopharatana, A., Chaiprasert, P., and Tanticharoen, M. 2002. Anaerobic treatment and biogas production from piggery waste in high solid content digester. *Abstracts of the 14th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology*, *12-15 November 2002*, *Khon Kaen*, *Thailand*: 86.

Kunawanakit, C. 1986. *Biogas Production by Anaerobic Digestion of Water Hyacinth*. M.Sc. Thesis, Chulalongkorn University, Thailand.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Kvesitadze, G., Sadunishvili, T., Dudauri, T., Zakariashvili, N., Partskhaladze, G., Ugrekhelidze, V., Tsiklauri, G., Metreveli, B., and Jobava, M. 2012. Two-stage anaerobic for bio-hydrogen and bio-methane combined production from biodegradable solid wastes. *Energy*. 37:94-102.

Larsen, A.C., Gomes, B.M., Gomes, S.D., Zenatti, D.C., and Torres, D.G.B. 2013. Anaerobic co-digestion of crude glycerin and starch industry effluent. *Engenharia Agricola*, *Jaboticabal*. 33(1): 341-352.

Mackie, R.I. and Bryant, M.P. 1995. Anaerobic digestion of cattle waste at mesophilic and thermophilic temperatures. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 43: 346-350.

Milono, P., Lindajati, T., and Aman, S. 1981. Biogas production from agricultural organic residues. *Proceedings of the 1st ASEAN Seminar-Workshop on Biogas Technology*, *Working Group on Food Waste Materials 1981*, *Manila*, *Philipines*: 52-65.

Neves, L., Ribeires, R., Oliveira, R., and Alves, M.M. 2006. Enhancement of methane production from barley waste. *Biomass and Bioenergy*. 30: 599-603.

Office Agricultural Economics. 2003. Agricultural Statistics of Thailand Crop Year. [On-line]. Available: http://www.oae.go.th/statistic/yearbook/2001-02

Okareh, O.T., Adeolu, A.T., and Shittu, O.I. 2012. Enrichment of pig dung with selected crop wastes for the production of biogas. *International Research Journal of Microbiology*. 3(7): 258-263.

Pandey, A., Soccol, C.R., Nigam, P., Soccol, V.T., Vanderberghe, L.P.S., and Mohan, R. 2000. Biotechnological potential of agro-industrial residues. II: Cassava bagasses. *Bioresource Technology*. 74: 81-87.

Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B., and Chaiprasert, P. 2012. Enhanced biomethanation in co-digestion of cassava pulp and pig manure using a two-phase anaerobic system. *Journal of Sustainable Energy* and *Environment*. 3: 73-79.

Parawira, W., Read, J.S., Mattiasson, B., and Björnsson, L. 2008. Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*. 32: 44-50.

Plummer, D.T. 1971. *An Introduction to Practical Biochemistry*, McGraw-Hill Book Company Limited, New York, U.S.A.

Polprasert, C. 1989. Organic wastes recycling. Quoted in: *Wastewater Microbiology*, G. Bitton (1994), *A John Wiley and Sons*, New York, U.S.A.

Punyawattoe, C. 1986. *A Study of Two-stage Methane Fermentation from Pineapple Cannery's Solid Waste*. M.Sc. Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Thailand.

Rodtong, S. and Anunputtikul, W. 2005. Conversion of raw cassava roots to biogas. *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies (APCSEET 5)*, *8-11 May 2005*, *Wellington*, *New Zealand*: 86-91.

Sangklinhom, P., Nopharatana, A., and Chaiprasert, P. 2002. Treatment and biogas production from food waste using a plug flow reactor. *Abstracts of the 14th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology*, *12-15 November 2002*, *Khon Kaen, Thailand*: 87.

Séne, M., Thévenot, C., and Prioul, J.L. 1997. Simultaneous spectrophotometric determination of amylose and amylopectin in starch from maize kernel by multi-wavelength analysis. *Journal of Cereal Science*. 26: 211-221.

Soccol, C.R. 1996. Biotechnology products from cassava root by solid state fermentation. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 55: 358-364.

Stuckey, D.C. 1984. Biogas: A global perspective. In: *Biogas Technology*, *Transfer and Diffusion*, M.M. EL-Halwagi, (ed.). New York, U.S.A: Elsevier Applied Science. pp. 18-44.

Sun, J.X., Sun, X.F., Sun, R.C., and Su, Y.Q. 2004. Fractional extraction and structural characterization of sugarcane bagasse hemicelluloses. *Carbohydrate Polymer*. 56: 195-204.

Supajunya, N., Tanticharoen, M., Bhumiratana, S., and Utitham, T. 1984. Biogas production from solid pineapple cannery waste at elevated temperature. *Proceedings of the 2nd ASEAN Workshop on Biogas Technology Applied to the Management and Utilization of Food Waste Materials 1984*. *Kuala Terengganu*, *Malaysia*: 203-218.

Tanticharoen, M., Bhumiratana, S., Tientanacom, S., and Pengsobha, L. 1984. Biogas production from solid pineapple waste. *In* Veziroglu, T.N. (ed.). *Renewable Energy Sources*: *International Progress*, Part B 1984, pp. 31-40. Amsterdam: Elsevier Science.

Vicenta, M., Pacheco, G., Alamis, M.L.A., Anglo, P.G., Tan, B.V., and Silverio, C.M. 1984. A study of some factors affecting biogas production from pineapple peelings. *Proceedings of the 2nd ASEAN Workshop on Biogas Technology Applied to the Management and Utilization of Food Waste Materials* 1984, *Kaula Terengganu*, *Malaysia*: 189-202.

Viswanath, P., Devi, S.S., and Nand, K. 1992. Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogas production. *Bioresource Technology*. 40: 43-48.

Xiao, B., Sun, X.F., and Sun, R.C. 2001. Chemical, structural, and thermal characterization of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw. *Polymer Degradation and Stability*. 74: 307-319.

Zaher, U., Bouvier, J.C., Steyer, J.P., and Vanrolleghem, P.A. 2004. Titrimetric monitoring of anaerobic digestion: VFA, alkalinities and more. [On-line]. Available: http://www.researchgate.net/publication/228514753_Titrimetric_monitoring_of_anaerobic_digestion_VFA_alkalinities_and_more/file/79e41510801d5d7e66.pdf

Zhang, R. and Zhang, Z. 1999. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. *Bioresource Technology*. 68: 235-245.

Zhang, Q., Zhu, X., Kong, L., Yuan, G., Zhai, Z., Liu, H., Guo, X. 2013. Comparative assessment of the methanogenic steps of single and two-stage processes without or with a previous hydrolysis of cassava distillage. *Bioresource Technology*. 147.

# ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก ตารางผนวก**

ผลการศึกษาการผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจากหัวมันสำปะหลังดิบทั้งเปลือกและกากมันสำปะหลังในระดับห้องปฏิบัติการใน Single-stage digester ที่มีปริมาตรหมัก 5, 10, 20 และ 50 ลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 1** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 5 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 26.0 | 26.0 | 7.89 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4,886.71 | 2,250 | 626 | 0.28 | 0.00 | 144.10 | 149.73 |
| 1 | 26.0 | 25.5 | 6.53 | 1.40 | 1.40 | 12.1 | 24.4 | 62.3 | 3,860.10 | 2,183 | 1,391 | 0.64 | ND | ND | ND |
| 2 | 26.0 | 25.0 | 6.86 | 2.31 | 3.71 | ND | ND | ND | ND | 3,533 | 2,096 | 0.59 | ND | ND | ND |
| 3 | 26.0 | 26.0 | 6.79 | 1.35 | 5.06 | 33.9 | 48.1 | 15.4 | 2,857.01 | 2,983 | 2,220 | 0.74 | 24.73 | 145.17 | 154.12 |
| 4 | 26.0 | 26.5 | 6.74 | 1.35 | 6.41 | ND | ND | ND | ND | 2,617 | 2,250 | 0.86 | ND | ND | ND |
| 5 | 26.0 | 26.5 | 6.86 | 1.29 | 7.70 | ND | ND | ND | ND | 3,533 | 2,775 | 0.79 | ND | ND | ND |
| 6 | 26.0 | 26.0 | 6.97 | 0.60 | 8.30 | 35.6 | 44.6 | 17.6 | 2,706.35 | 3,800 | 2,801 | 0.74 | 12.21 | 163.67 | 161.34 |
| 7 | 26.0 | 26.5 | 7.04 | 0.60 | 8.90 | ND | ND | ND | ND | 3,900 | 2,775 | 0.71 | ND | ND | ND |
| 8 | 27.0 | 26.5 | 6.99 | 1.03 | 9.93 | ND | ND | ND | ND | 3,783 | 2,825 | 0.75 | ND | ND | ND |
| 9 | 27.0 | 27.0 | 7.02 | 0.98 | 10.92 | 43.5 | 34.3 | 20.4 | 1,937.41 | 3,800 | 2,801 | 0.74 | 10.72 | 162.44 | 161.97 |
| 10 | 27.0 | 27.0 | 7.06 | 0.73 | 11.65 | ND | ND | ND | ND | 3,717 | 2,850 | 0.77 | ND | ND | ND |
| 11 | 27.0 | 26.0 | 7.10 | 1.03 | 12.68 | ND | ND | ND | ND | 3,900 | 2,625 | 0.67 | ND | ND | ND |
| 12 | 26.0 | 25.0 | 7.19 | 0.93 | 13.62 | 52.3 | 23.4 | 22.0 | 1,287.25 | 3,733 | 2,525 | 0.68 | 0.00 | 161.29 | 161.09 |
| 13 | 25.0 | 24.5 | 7.26 | 0.88 | 14.50 | ND | ND | ND | ND | 3,767 | 2,501 | 0.66 | ND | ND | ND |
| 14 | 25.0 | 24.0 | 7.30 | 0.97 | 15.47 | ND | ND | ND | ND | 4,900 | 3,000 | 0.61 | ND | ND | ND |
| 15 | 24.0 | 24.0 | 7.43 | 0.95 | 16.42 | 61.6 | 15.5 | 20.6 | 836.71 | 4,967 | 2,400 | 0.48 | 0.00 | 165.20 | 279.98 |
| 16 | 25.0 | 24.5 | 7.56 | 0.72 | 17.14 | ND | ND | ND | ND | 5,100 | 2,261 | 0.44 | ND | ND | ND |
| 17 | 25.0 | 25.0 | 7.59 | 0.78 | 17.92 | ND | ND | ND | ND | 5,317 | 2,100 | 0.39 | ND | ND | ND |
| 18 | 24.0 | 24.0 | 7.60 | 0.72 | 18.64 | 60.1 | 10.0 | 23.0 | 977.25 | 5,367 | 1,800 | 0.34 | 12.50 | 163.64 | 165.65 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 1** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 5 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 23.0 | 23.0 | 7.60 | 0.40 | 19.04 | ND | ND | ND | ND | 5,350 | 1,725 | 0.32 | ND | ND | ND |
| 20 | 24.0 | 24.0 | 7.60 | 0.10 | 19.14 | ND | ND | ND | ND | 5,500 | 1,650 | 0.30 | ND | ND | ND |
| 21 | 25.0 | 24.0 | 7.62 | 0.10 | 19.24 | ND | ND | ND | 532.25 | 5,550 | 1,600 | 0.29 | 0.00 | 149.25 | 153.02 |
| 22 | 26.5 | 26.0 | 7.54 | 0.00 | 19.24 | ND | ND | ND | ND | 3,825 | 938 | 0.25 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 2** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 5 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 26.0 | 26.0 | 6.47 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4,648.50 | 2,250 | 1,950 | 0.87 | ND | ND | ND |
| 1 | 26.0 | 25.5 | 6.72 | 9.24 | 9.24 | ND | ND | ND | ND | 3,283 | 3,290 | 1.00 | ND | ND | ND |
| 2 | 26.0 | 25.0 | 6.73 | 1.87 | 11.10 | ND | ND | ND | ND | 3,550 | 3,251 | 0.92 | ND | ND | ND |
| 3 | 26.0 | 26.0 | 7.02 | 1.30 | 12.40 | 32.0 | 44.7 | 21.4 | 1,648.02 | 4,567 | 3,551 | 0.78 | 22.46 | 147.75 | 272.18 |
| 4 | 26.0 | 26.5 | 7.14 | 1.18 | 13.59 | ND | ND | ND | ND | 4,783 | 3,551 | 0.74 | ND | ND | ND |
| 5 | 26.0 | 26.5 | 7.26 | 1.40 | 14.99 | ND | ND | ND | ND | 5,033 | 3,000 | 0.60 | ND | ND | ND |
| 6 | 26.0 | 26.0 | 7.44 | 1.32 | 16.30 | 48.1 | 31.6 | 18.4 | 1,552.49 | 5,067 | 2,900 | 0.57 | 11.87 | 137.49 | 388.32 |
| 7 | 26.0 | 26.5 | 7.44 | 1.50 | 17.80 | ND | ND | ND | ND | 5,250 | 3,075 | 0.59 | ND | ND | ND |
| 8 | 27.0 | 26.5 | 7.55 | 2.02 | 19.82 | ND | ND | ND | ND | 5,233 | 3,050 | 0.58 | ND | ND | ND |
| 9 | 27.0 | 27.0 | 7.64 | 1.98 | 21.80 | 66.1 | 20.5 | 11.4 | 1,497.23 | 5,500 | 2,285 | 0.42 | 15.75 | 181.97 | 165.33 |
| 10 | 27.0 | 27.0 | 7.71 | 1.68 | 23.49 | ND | ND | ND | ND | 5,883 | 2,201 | 0.37 | ND | ND | ND |
| 11 | 27.0 | 26.0 | 7.79 | 1.10 | 24.59 | ND | ND | ND | ND | 5,733 | 1,676 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 12 | 26.0 | 25.0 | 7.84 | 0.98 | 25.57 | 62.5 | 10.1 | 21.7 | 1,500.06 | 5,700 | 1,700 | 0.30 | 15.87 | 185.28 | 165.39 |
| 13 | 25.0 | 24.5 | 7.82 | 0.68 | 26.25 | ND | ND | ND | ND | 6,933 | 1,976 | 0.28 | ND | ND | ND |
| 14 | 25.0 | 24.0 | 7.83 | 0.52 | 26.77 | ND | ND | ND | ND | 7,033 | 1,800 | 0.26 | ND | ND | ND |
| 15 | 24.0 | 24.0 | 7.91 | 0.13 | 26.90 | 64.3 | 8.8 | 25.0 | 1,332.16 | 7,240 | 1,700 | 0.23 | 15.11 | 180.17 | 161.14 |
| 16 | 25.0 | 24.5 | 7.88 | 0.08 | 26.98 | ND | ND | ND | ND | 7,433 | 1,616 | 0.22 | ND | ND | ND |
| 17 | 25.0 | 25.0 | 7.89 | 0.04 | 27.02 | ND | ND | ND | 1,311.48 | 7,300 | 1,560 | 0.21 | ND | ND | ND |
| 18 | 24.0 | 24.0 | 7.90 | 0.00 | 27.02 | ND | ND | ND | ND | 7,350 | 1,500 | 0.20 | 0.00 | 219.14 | 192.24 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 3** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 20 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 6.59 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4,663.45 | 900 | 600 | 0.67 | 323.49 | 0.00 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 30.0 | 6.51 | 2.54 | 2.35 | 12.7 | 86.9 | 0.1 | 3,120.26 | 1,900 | 1,800 | 0.95 | ND | ND | ND |
| 2 | 30.0 | 30.0 | 6.58 | 3.63 | 5.98 | 20.4 | 77.7 | 1.4 | 2,695.68 | 3,400 | 3,690 | 1.09 | ND | ND | ND |
| 3 | 29.0 | 29.0 | 7.06 | 7.98 | 13.96 | 23.8 | 73.7 | 1.9 | 2,524.22 | 4,860 | 4,020 | 0.83 | 2,787.82 | 892.69 | 1,000.74 |
| 4 | 29.0 | 29.0 | 7.10 | 7.15 | 21.11 | 19.8 | 79.9 | 0.2 | 1,748.54 | 6,200 | 5,100 | 0.82 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 6.89 | 6.71 | 27.82 | 14.7 | 79.9 | 5.0 | 1,294.77 | 6,300 | 5,460 | 0.87 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.77 | 4.90 | 32.72 | 18.7 | 79.1 | 1.5 | 1,498.89 | 5,720 | 5,790 | 1.01 | 3,705.06 | 1,642.22 | 1,187.09 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.13 | 2.97 | 35.69 | 25.5 | 74.2 | 0.1 | 1,819.06 | 6,800 | 5,550 | 0.82 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.38 | 2.31 | 38.00 | 33.1 | 65.8 | 0.7 | 1,400.61 | 7,300 | 5,550 | 0.76 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.40 | 1.87 | 39.87 | 38.7 | 57.0 | 3.9 | 1,047.00 | 7,200 | 6,150 | 0.85 | 3,460.17 | 1,996.18 | 2,188.54 |
| 10 | 29.0 | 29.0 | 7.31 | 1.93 | 41.80 | 44.6 | 50.8 | 4.3 | 1,123.75 | 7,500 | 5,670 | 0.76 | ND | ND | ND |
| 11 | 29.0 | 29.0 | 7.44 | 2.15 | 43.95 | 50.3 | 45.0 | 4.6 | 782.45 | 7,800 | 5,370 | 0.69 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.61 | 2.20 | 46.15 | 54.3 | 38.8 | 6.5 | 930.99 | 8,020 | 5,190 | 0.65 | 2,519.26 | 1,125.23 | 1,282.47 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.73 | 2.69 | 48.84 | 58.6 | 34.1 | 7.1 | 817.09 | 8,040 | 5,100 | 0.63 | ND | ND | ND |
| 14 | 29.0 | 29.0 | 7.62 | 3.19 | 52.03 | 62.5 | 30.0 | 7.4 | 632.09 | 7,300 | 4,440 | 0.61 | ND | ND | ND |
| 15 | 29.0 | 29.0 | 7.74 | 3.36 | 55.39 | 62.6 | 18.3 | 18.9 | 610.05 | 7,400 | 4,200 | 0.57 | 2445.23 | 1,342.15 | 1,046.85 |
| 16 | 29.0 | 29.0 | 7.81 | 5.78 | 61.17 | 69.1 | 24.9 | 5.8 | 677.82 | 7,940 | 4,320 | 0.54 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 29.0 | 7.75 | 5.33 | 66.50 | 71.6 | 22.6 | 5.7 | 707.21 | 7,300 | 4,440 | 0.61 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.92 | 2.37 | 68.87 | 72.0 | 22.0 | 5.8 | 935.83 | 7,400 | 4,200 | 0.57 | 2,292.12 | 1,178.89 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 3** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 20 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.88 | 3.68 | 72.55 | 74.3 | 19.6 | 6.1 | 875.41 | 7,300 | 3,960 | 0.54 | ND | ND | ND |
| 20 | 30.0 | 30.0 | 7.93 | 3.25 | 75.80 | 75.0 | 18.4 | 6.2 | 782.33 | 7,500 | 3,660 | 0.49 | ND | ND | ND |
| 21 | 31.0 | 30.0 | 8.27 | 2.75 | 78.55 | 72.1 | 16.5 | 10.4 | 881.13 | 7,860 | 3,420 | 0.44 | 1,894.54 | 1,705.14 | 0.00 |
| 22 | 30.0 | 30.0 | 8.41 | 2.58 | 81.13 | 75.4 | 15.7 | 8.4 | 1,055.04 | 8,040 | 3,300 | 0.41 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 8.08 | 2.42 | 83.55 | 76.3 | 14.7 | 8.6 | 886.03 | 7,600 | 2,850 | 0.38 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 8.25 | 1.60 | 85.15 | 76.4 | 14.1 | 9.1 | 1,058.31 | 7,800 | 2,940 | 0.38 | 910.93 | 1,541.33 | 0.00 |
| 25 | 30.0 | 30.0 | 8.35 | 1.92 | 87.07 | 76.6 | 13.6 | 9.4 | 917.05 | 7,800 | 2,430 | 0.31 | ND | ND | ND |
| 26 | 30.0 | 30.0 | 8.51 | 1.54 | 88.61 | 76.7 | 12.7 | 10.1 | 853.37 | 7,800 | 2,250 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 8.19 | 1.10 | 89.71 | 77.3 | 12.5 | 9.7 | 657.41 | 7,400 | 1,950 | 0.26 | 424.24 | 835.86 | 0.00 |
| 28 | 31.0 | 31.0 | 8.32 | 1.04 | 90.75 | 76.0 | 12.5 | 10.9 | 615.76 | 8,060 | 1,860 | 0.23 | ND | ND | ND |
| 29 | 30.0 | 30.0 | 8.38 | 0.94 | 91.69 | 74.5 | 13.0 | 11.9 | 330.34 | 7,960 | 1,890 | 0.24 | ND | ND | ND |
| 30 | 30.0 | 30.0 | 8.45 | 0.99 | 92.68 | 74.0 | 13.1 | 12.3 | 296.04 | 7,640 | 1,650 | 0.22 | 222.84 | 790.80 | 0.00 |
| 31 | 29.0 | 29.0 | 8.45 | 0.44 | 93.12 | 74.0 | 12.9 | 12.7 | 273.59 | 7,900 | 1,500 | 0.19 | ND | ND | ND |
| 32 | 29.0 | 29.0 | 8.48 | 0.28 | 93.40 | 72.3 | 13.1 | 14.2 | 451.99 | 7,900 | 1,650 | 0.21 | ND | ND | ND |
| 33 | 30.0 | 30.0 | 8.23 | 0.11 | 93.51 | 70.6 | 13.0 | 16.0 | 311.56 | 8,020 | 1,980 | 0.25 | 149.67 | 837.33 | 0.00 |
| 34 | 30.0 | 30.0 | 8.33 | 0.11 | 93.62 | 68.1 | 13.2 | 18.3 | 253.99 | 8,400 | 1,830 | 0.22 | ND | ND | ND |
| 35 | 29.0 | 29.0 | 8.41 | 0.06 | 93.68 | 67.1 | 13.8 | 19.0 | 232.36 | 8,820 | 1,890 | 0.21 | ND | ND | ND |
| 36 | 29.0 | 29.0 | 8.46 | 0.00 | 93.68 | 60.0 | 13.7 | 25.8 | 210.72 | 9,000 | 1,710 | 0.19 | 117.19 | 683.25 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 4** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.088% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 20 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 6.74 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4,557.30 | 800 | 750 | 0.94 | 74.81 | 244.72 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 30.0 | 6.21 | 1.90 | 1.90 | 8.2 | 67.7 | 21.7 | 2,769.17 | 1,600 | 2,280 | 1.43 | ND | ND | ND |
| 2 | 30.0 | 30.0 | 6.37 | 2.733 | 4.63 | 13.5 | 83.6 | 3.5 | 3,120.26 | 2,900 | 3,210 | 1.11 | ND | ND | ND |
| 3 | 29.0 | 29.0 | 6.66 | 8.91 | 13.54 | 13.0 | 85.6 | 2.5 | 2,573.21 | 3,900 | 3,660 | 0.94 | 2,152.64 | 951.08 | 1,075.21 |
| 4 | 29.0 | 29.0 | 6.78 | 5.34 | 18.88 | 10.3 | 89.0 | 0.1 | 1,801.00 | 4,800 | 5,040 | 1.05 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 6.75 | 3.36 | 22.24 | 10.4 | 89.8 | 0.1 | 1,388.67 | 6,200 | 5,400 | 0.87 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.76 | 2.53 | 24.77 | 13.3 | 85.9 | 0.1 | 1,511.14 | 6,100 | 5,670 | 0.93 | 2,547.91 | 1,240.22 | 1,839.76 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.16 | 2.48 | 27.25 | 16.5 | 82.7 | 0.5 | 1,737.41 | 6,800 | 5,550 | 0.82 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.26 | 1.71 | 28.96 | 19.6 | 80.1 | 0.1 | 1,463.88 | 7,120 | 5,610 | 0.79 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.35 | 1.38 | 30.34 | 24.1 | 73.0 | 2.9 | 1,241.33 | 6,200 | 5,550 | 0.90 | 3,309.90 | 1,708.12 | 1,762.97 |
| 10 | 29.0 | 29.0 | 7.02 | 1.38 | 31.72 | 27.8 | 67.9 | 3.9 | 1,246.23 | 6,460 | 5,760 | 0.89 | ND | ND | ND |
| 11 | 29.0 | 29.0 | 7.15 | 1.21 | 32.93 | 32.5 | 63.0 | 4.2 | 831.44 | 7,040 | 5,850 | 0.83 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.25 | 1.49 | 34.42 | 36.8 | 59.2 | 3.8 | 689.72 | 7,400 | 6,060 | 0.82 | 2,603.62 | 1,676.97 | 1,209.86 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.45 | 1.65 | 36.07 | 39.0 | 52.8 | 7.6 | 623.58 | 7,500 | 5,850 | 0.78 | ND | ND | ND |
| 14 | 29.0 | 29.0 | 7.41 | 1.54 | 37.61 | 43.2 | 47.8 | 8.5 | 748.85 | 7,500 | 5,640 | 0.75 | ND | ND | ND |
| 15 | 29.0 | 29.0 | 7.50 | 0.83 | 38.44 | 49.4 | 42.0 | 8.1 | 782.33 | 7,040 | 5,220 | 0.74 | 2,603.62 | 1,676.97 | 1,209.86 |
| 16 | 29.0 | 29.0 | 7.50 | 2.64 | 41.08 | 54.2 | 37.3 | 8.0 | 678.63 | 7,660 | 5,610 | 0.73 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 29.0 | 7.53 | 1.16 | 42.24 | 60.0 | 32.6 | 7.1 | 989.72 | 7,840 | 5,550 | 0.71 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.67 | 1.43 | 43.67 | 63.2 | 30.2 | 6.6 | 854.18 | 7,240 | 4,950 | 0.68 | 1,794.17 | 1,327.94 | 737.09 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)
[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)
[c] Titration method (AOAC International, 2000)
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)
ND, Not determined
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 4** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.088% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 20 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 30.0 | 29.0 | 7.59 | 0.93 | 44.60 | 66.1 | 27.3 | 6.6 | 908.07 | 7,340 | 4,680 | 0.64 | ND | ND | ND |
| 20 | 30.0 | 30.0 | 7.68 | 3.14 | 47.74 | 67.7 | 25.2 | 7.1 | 788.86 | 7,480 | 4,650 | 0.62 | ND | ND | ND |
| 21 | 31.0 | 30.0 | 7.98 | 3.08 | 50.82 | 70.1 | 24.1 | 5.8 | 930.93 | 7,400 | 3,900 | 0.53 | 2,154.64 | 1,795.87 | 579.07 |
| 22 | 30.0 | 30.0 | 8.11 | 3.19 | 54.01 | 71.2 | 22.8 | 5.9 | 870.51 | 7,800 | 4,230 | 0.54 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 7.81 | 2.64 | 56.65 | 70.4 | 21.7 | 7.5 | 851.73 | 7,400 | 3,810 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 7.95 | 0.88 | 57.53 | 72.0 | 21.1 | 6.8 | 647.61 | 7,480 | 3,750 | 0.50 | 1,753.79 | 1,452.73 | 385.92 |
| 25 | 30.0 | 30.0 | 8.17 | 2.36 | 59.89 | 72.2 | 20.1 | 7.6 | 1143.22 | 7,600 | 3,450 | 0.45 | ND | ND | ND |
| 26 | 30.0 | 30.0 | 8.34 | 1.93 | 61.82 | 75.3 | 18.4 | 6.2 | 1,126.89 | 7,800 | 2,850 | 0.37 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.95 | 1.98 | 63.80 | 73.6 | 20.6 | 5.7 | 1,026.46 | 7,440 | 2,700 | 0.36 | 1,466.55 | 1,671.01 | 0.00 |
| 28 | 31.0 | 31.0 | 8.16 | 0.44 | 64.24 | 77.1 | 16.7 | 6.1 | 959.51 | 7,700 | 2,880 | 0.37 | ND | ND | ND |
| 29 | 30.0 | 30.0 | 8.24 | 1.71 | 65.95 | 77.0 | 16.0 | 6.9 | 724.36 | 7,760 | 2,490 | 0.32 | ND | ND | ND |
| 30 | 30.0 | 30.0 | 8.44 | 0.94 | 66.89 | 76.3 | 15.2 | 8.4 | 480.23 | 7,400 | 2,400 | 0.32 | 713.68 | 1,272.80 | 0.00 |
| 31 | 29.0 | 29.0 | 8.46 | 0.28 | 67.17 | 75.1 | 14.2 | 10.4 | 362.18 | 8,200 | 2,340 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 32 | 29.0 | 29.0 | 8.44 | 0.99 | 68.16 | 75.9 | 13.8 | 10.2 | 327.89 | 7,300 | 1,710 | 0.23 | ND | ND | ND |
| 33 | 30.0 | 30.0 | 8.23 | 0.94 | 69.10 | 76.9 | 13.5 | 4.5 | 322.17 | 7,700 | 2,340 | 0.30 | 641.61 | 1,752.68 | 266.75 |
| 34 | 30.0 | 30.0 | 8.23 | 0.66 | 69.76 | 77.0 | 13.5 | 9.5 | 239.30 | 7,820 | 2,190 | 0.28 | ND | ND | ND |
| 35 | 29.0 | 29.0 | 8.40 | 0.42 | 70.18 | 78.0 | 13.6 | 8.4 | 222.15 | 8,680 | 2,250 | 0.26 | ND | ND | ND |
| 36 | 29.0 | 29.0 | 8.25 | 0.00 | 70.18 | 74.8 | 12.9 | 12.1 | 198.06 | 8,600 | 2,100 | 0.24 | 345.68 | 1,186.10 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 5** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมโพแทสเซียมไนเตรท 0.142% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 20 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 6.73 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5,292.15 | 900 | 480 | 0.53 | 241.37 | 0.00 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 30.0 | 6.80 | 1.90 | 1.90 | 3.2 | 67.8 | 28.1 | 3,038.61 | 2,320 | 1,320 | 0.57 | ND | ND | ND |
| 2 | 30.0 | 30.0 | 6.42 | 2.30 | 4.20 | 6.5 | 94.2 | 4.2 | 3,087.60 | 3,660 | 4,170 | 1.14 | ND | ND | ND |
| 3 | 29.0 | 29.0 | 6.97 | 12.54 | 16.74 | 10.4 | 88.9 | 0.2 | 3,038.61 | 5,600 | 4,410 | 0.79 | 2,211.39 | 765.93 | 775.62 |
| 4 | 29.0 | 29.0 | 7.09 | 10.95 | 27.69 | 9.9 | 89.6 | 0.1 | 1,968.38 | 7,200 | 5,550 | 0.77 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 6.93 | 6.93 | 34.62 | 12.0 | 87.5 | 0.1 | 2,086.77 | 7,600 | 6,000 | 0.79 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.82 | 6.16 | 40.78 | 12.8 | 86.8 | 0.1 | 1,270.27 | 6,960 | 6,330 | 0.91 | 2,984.80 | 880.88 | 1,977.32 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.17 | 2.70 | 43.48 | 22.7 | 76.8 | 0.1 | 1,629.23 | 7,700 | 6,300 | 0.82 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.26 | 1.82 | 45.30 | 29.8 | 69.8 | 0.1 | 1,431.22 | 7,940 | 6,180 | 0.78 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.30 | 1.65 | 46.95 | 36.1 | 61.8 | 1.8 | 1,110.69 | 6,520 | 6,510 | 1.00 | 4,117.03 | 2,346.61 | 1,523.92 |
| 10 | 29.0 | 29.0 | 7.24 | 1.82 | 48.77 | 43.0 | 56.5 | 2.2 | 1,396.46 | 6,800 | 6,330 | 0.93 | ND | ND | ND |
| 11 | 29.0 | 29.0 | 7.32 | 2.15 | 50.92 | 47.5 | 48.1 | 4.1 | 808.58 | 7,600 | 6,600 | 0.87 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.45 | 2.31 | 53.23 | 52.6 | 43.0 | 4.3 | 746.06 | 7,840 | 6,390 | 0.82 | 3,164.76 | 2,186.13 | 737.21 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.71 | 2.75 | 55.98 | 56.5 | 37.4 | 5.8 | 815.87 | 8,400 | 6,090 | 0.73 | ND | ND | ND |
| 14 | 29.0 | 29.0 | 7.60 | 3.14 | 59.12 | 60.1 | 32.5 | 7.0 | 888.13 | 8,400 | 5,940 | 0.71 | ND | ND | ND |
| 15 | 29.0 | 29.0 | 7.83 | 3.24 | 62.36 | 65.7 | 27.9 | 5.9 | 1,056.67 | 8,000 | 5,100 | 0.64 | 2,684.55 | 2,182.42 | 684.66 |
| 16 | 29.0 | 29.0 | 7.80 | 4.35 | 66.71 | 69.8 | 25.5 | 4.6 | 1,037.08 | 8,520 | 5,400 | 0.63 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 29.0 | 7.77 | 4.24 | 70.95 | 73.0 | 21.7 | 5.2 | 817.44 | 8,000 | 4,800 | 0.60 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.82 | 2.09 | 73.04 | 74.8 | 20.4 | 4.7 | 775.80 | 8,000 | 4,650 | 0.58 | 1,848.32 | 2,325.88 | 277.85 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)
[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)
[c] Titration method (AOAC International, 2000)
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)
ND, Not determined
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 5** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมโพแทสเซียมไนเตรท 0.142% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 20 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 30.0 | 29.0 | 7.88 | 1.87 | 74.91 | 75.3 | 19.0 | 5.7 | 787.23 | 8,200 | 4,800 | 0.59 | ND | ND | ND |
| 20 | 30.0 | 30.0 | 7.89 | 5.28 | 80.19 | 76.2 | 18.3 | 5.4 | 798.66 | 8,040 | 3,600 | 0.45 | ND | ND | ND |
| 21 | 31.0 | 30.0 | 8.25 | 1.65 | 81.84 | 75.5 | 17.3 | 6.9 | 941.55 | 8,400 | 4,050 | 0.48 | 1,705.71 | 2,041.89 | 0.00 |
| 22 | 30.0 | 30.0 | 8.47 | 3.03 | 84.87 | 76.1 | 16.8 | 7.2 | 675.37 | 8,600 | 3,600 | 0.42 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 8.12 | 3.03 | 87.90 | 77.2 | 15.6 | 7.0 | 819.07 | 8,440 | 3,360 | 0.40 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 8.27 | 2.36 | 90.26 | 78.3 | 15.4 | 6.1 | 724.36 | 7,900 | 2,700 | 0.34 | 866.34 | 1,686.39 | 0.00 |
| 25 | 30.0 | 30.0 | 8.46 | 2.64 | 92.90 | 76.6 | 13.6 | 9.4 | 607.60 | 8,500 | 2,880 | 0.34 | ND | ND | ND |
| 26 | 30.0 | 30.0 | 8.51 | 2.04 | 94.94 | 78.9 | 13.3 | 7.5 | 621.48 | 8,600 | 2,460 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 8.19 | 1.76 | 96.70 | 80.1 | 13.3 | 6.4 | 662.30 | 8,120 | 2,610 | 0.32 | 404.18 | 1,400.15 | 187.38 |
| 28 | 31.0 | 31.0 | 8.35 | 1.65 | 98.35 | 80.2 | 13.1 | 6.4 | 327.54 | 8,800 | 2,340 | 0.27 | ND | ND | ND |
| 29 | 30.0 | 30.0 | 8.45 | 1.54 | 99.89 | 79.8 | 13.3 | 6.6 | 475.33 | 8,200 | 2,100 | 0.26 | ND | ND | ND |
| 30 | 30.0 | 30.0 | 8.50 | 1.43 | 101.32 | 79.9 | 13.0 | 6.8 | 534.11 | 8,300 | 2,640 | 0.32 | 124.47 | 1,275.40 | 136.20 |
| 31 | 29.0 | 29.0 | 8.53 | 0.72 | 102.04 | 80.4 | 12.6 | 6.7 | 347.48 | 8,600 | 2,040 | 0.24 | ND | ND | ND |
| 32 | 29.0 | 29.0 | 8.56 | 0.82 | 102.86 | 80.4 | 12.7 | 6.7 | 351.56 | 8,400 | 1,980 | 0.24 | ND | ND | ND |
| 33 | 30.0 | 30.0 | 8.28 | 0.44 | 103.30 | 80.1 | 12.3 | 7.4 | 240.11 | 8,400 | 1,980 | 0.24 | 70.25 | 1,309.38 | 0.00 |
| 34 | 30.0 | 30.0 | 8.37 | 0.50 | 103.80 | 78.5 | 12.4 | 8.7 | 245.83 | 8,680 | 1,920 | 0.22 | ND | ND | ND |
| 35 | 29.0 | 29.0 | 8.44 | 0.11 | 103.91 | 80.1 | 12.8 | 7.0 | 212.76 | 9,600 | 2,100 | 0.22 | ND | ND | ND |
| 36 | 29.0 | 29.0 | 8.35 | 0.00 | 103.91 | 77.3 | 12.8 | 9.8 | 217.66 | 9,700 | 2,190 | 0.23 | 20.00 | 1,101.60 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 6** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 7.67 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3030.44 | 1,000 | 600 | 0.60 | 87.47 | 244.72 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 30.0 | 7.15 | 1.60 | 1.60 | 25.5 | 44.2 | 28.8 | 1560.14 | 2,400 | 1,260 | 0.53 | ND | ND | ND |
| 2 | 30.0 | 30.0 | 6.96 | 2.40 | 4.00 | 27.4 | 72.0 | 0.2 | 862.02 | 4,100 | 1,980 | 0.48 | ND | ND | ND |
| 3 | 29.0 | 29.0 | 7.46 | 1.60 | 5.60 | 28.8 | 66.6 | 4.2 | 919.18 | 5,700 | 2,130 | 0.37 | 1,584.84 | 142.24 | 125.34 |
| 4 | 29.0 | 29.0 | 7.47 | 1.80 | 7.40 | 29.2 | 66.9 | 3.5 | 1111.06 | 7,400 | 2,700 | 0.36 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 7.43 | 1.40 | 8.80 | 32.7 | 61.7 | 5.2 | 1719.92 | 7,980 | 2,850 | 0.36 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 7.36 | 0.80 | 9.60 | 37.5 | 55.5 | 6.5 | 1320.64 | 7,600 | 3,030 | 0.40 | 1,712.99 | 722.96 | 245.11 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.75 | 0.60 | 10.20 | 40.3 | 50.3 | 9.2 | 1511.72 | 7,900 | 2,700 | 0.34 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.94 | 0.80 | 11.00 | 41.0 | 44.4 | 13.8 | 1269.22 | 8,500 | 2,580 | 0.30 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 8.24 | 0.70 | 11.70 | 43.4 | 41.7 | 14.8 | 1014.46 | 8,000 | 2,850 | 0.36 | 1,507.63 | 286.56 | 691.79 |
| 10 | 29.0 | 29.0 | 7.69 | 0.80 | 12.50 | 44.4 | 37.8 | 17.0 | 1203.08 | 8,340 | 2,550 | 0.31 | ND | ND | ND |
| 11 | 29.0 | 29.0 | 7.75 | 1.00 | 13.50 | 48.2 | 36.1 | 15.1 | 1043.86 | 8,480 | 2,100 | 0.25 | ND | ND | ND, |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.82 | 0.80 | 14.30 | 47.8 | 34.1 | 17.7 | 1078.02 | 8,640 | 2,280 | 0.26 | 1,030.91 | 238.67 | 0.00 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.98 | 0.50 | 14.80 | 50.3 | 32.8 | 16.8 | 1117.22 | 8,800 | 2,340 | 0.27 | ND | ND | ND |
| 14 | 29.0 | 29.0 | 7.84 | 0.40 | 15.20 | 50.2 | 31.1 | 18.2 | 852.54 | 8,900 | 2,610 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 15 | 29.0 | 28.5 | 7.92 | 0.40 | 15.60 | 50.8 | 29.4 | 19.5 | 647.60 | 8,720 | 2,190 | 0.25 | 965.67 | 242.51 | 0.00 |
| 16 | 29.0 | 29.0 | 7.95 | 0.30 | 15.90 | 50.6 | 28.8 | 20.1 | 912.98 | 8,900 | 2,160 | 0.24 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 29.0 | 7.91 | 0.25 | 16.15 | 50.4 | 26.3 | 22.6 | 630.46 | 8,200 | 1,740 | 0.21 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.97 | 0.35 | 16.50 | 50.4 | 25.6 | 23.6 | 490.84 | 8,200 | 1,500 | 0.18 | 763.97 | 188.73 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 6** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 30.0 | 29.0 | 7.85 | 0.20 | 16.70 | 49.0 | 24.2 | 26.0 | 430.42 | 8,300 | 1,830 | 0.22 | ND | ND | ND |
| 20 | 30.0 | 30.0 | 7.96 | 0.15 | 16.85 | 50.7 | 24.1 | 25.1 | 316.92 | 8,400 | 1,920 | 0.23 | ND | ND | ND |
| 21 | 31.0 | 30.0 | 8.22 | 0.00 | 16.85 | 52.7 | 23.0 | 24.1 | 255.68 | 8,300 | 1,440 | 0.17 | 716.06 | 182.18 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 7** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 7.21 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2,160.26 | 1,400 | 600 | 0.43 | 60.83 | 244.72 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 31.0 | 7.14 | 5.36 | 5.36 | 16.5 | 82.9 | 0.2 | 1,882.65 | 3,100 | 1,950 | 0.63 | ND | ND | ND |
| 2 | 31.0 | 31.0 | 7.64 | 8.73 | 14.09 | 19.6 | 79.8 | 0.2 | 1,747.93 | 5,100 | 2,400 | 0.47 | ND | ND | ND |
| 3 | 30.0 | 30.0 | 7.72 | 4.55 | 18.64 | 21.9 | 77.5 | 0.2 | 1,723.43 | 6,900 | 2,880 | 0.42 | 602.02 | 678.10 | 447.62 |
| 4 | 30.0 | 30.0 | 7.64 | 4.46 | 23.10 | 17.2 | 82.1 | 0.2 | 1,237.61 | 6,900 | 3,150 | 0.46 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 7.68 | 3.29 | 26.39 | 23.2 | 76.0 | 0.1 | 1,347.53 | 7,300 | 3,390 | 0.46 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.81 | 2.25 | 28.64 | 32.2 | 65.9 | 1.5 | 1,133.20 | 5,000 | 5,250 | 1.05 | 750.91 | 338.76 | 377.20 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.35 | 1.44 | 30.08 | 37.9 | 54.8 | 6.9 | 998.48 | 6,300 | 4,110 | 0.65 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.41 | 1.04 | 31.12 | 41.6 | 49.2 | 8.9 | 1,527.16 | 6,560 | 4,230 | 0.64 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.51 | 0.95 | 32.07 | 43.6 | 44.2 | 11.8 | 1,321.00 | 6,700 | 4,200 | 0.63 | 1,096.90 | 476.94 | 589.20 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 7.59 | 0.72 | 32.79 | 45.5 | 39.4 | 14.8 | 1,323.04 | 6,500 | 3,900 | 0.60 | ND | ND | ND |
| 11 | 31.0 | 30.0 | 7.54 | 0.77 | 33.56 | 47.0 | 35.8 | 16.9 | 1,697.69 | 6,960 | 4,050 | 0.58 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.47 | 0.72 | 34.28 | 49.1 | 32.8 | 17.7 | 1,751.58 | 7,000 | 3,900 | 0.56 | 1,019.58 | 1,100.82 | 955.52 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.49 | 0.99 | 35.27 | 53.6 | 28.1 | 17.8 | 1,626.65 | 7,120 | 3,900 | 0.55 | ND | ND | ND |
| 14 | 30.5 | 30.0 | 7.54 | 0.13 | 35.40 | 56.0 | 26.0 | 17.5 | 1,379.25 | 7,100 | 3,690 | 0.52 | ND | ND | ND |
| 15 | 31.0 | 31.0 | 7.57 | 1.13 | 36.53 | 58.7 | 24.7 | 16.2 | 678.70 | 6,960 | 3,450 | 0.50 | 1,471.83 | 767.01 | 795.60 |
| 16 | 31.0 | 30.0 | 7.60 | 0.41 | 36.94 | 59.0 | 23.2 | 17.2 | 1,203.64 | 7,000 | 3,480 | 0.50 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.79 | 0.63 | 37.57 | 62.5 | 23.5 | 13.6 | 1,061.57 | 7,200 | 3,390 | 0.47 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.95 | 1.00 | 38.57 | 62.9 | 22.4 | 14.3 | 1,205.28 | 7,400 | 3,390 | 0.46 | 1,497.89 | 1,209.38 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 7** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.91 | 1.00 | 39.57 | 63.6 | 21.0 | 15.0 | 810.09 | 7,760 | 3,480 | 0.45 | ND | ND | ND |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 8.06 | 0.80 | 40.37 | 59.2 | 20.3 | 20.2 | 477.71 | 7,840 | 2,880 | 0.37 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 8.00 | 0.80 | 41.17 | 59.1 | 19.7 | 20.8 | 314.41 | 8,000 | 2,910 | 0.36 | 1,140.18 | 1,826.60 | 0.00 |
| 22 | 30.0 | 29.0 | 8.00 | 0.80 | 41.97 | 59.3 | 19.5 | 20.8 | 490.78 | 8,360 | 2,820 | 0.34 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 7.95 | 0.70 | 42.67 | 57.3 | 19.1 | 23.2 | 495.27 | 7,700 | 2,550 | 0.33 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 8.19 | 0.60 | 43.27 | 56.8 | 18.1 | 23.8 | 483.43 | 8,800 | 2,700 | 0.31 | 997.87 | 938.26 | 0.00 |
| 25 | 29.0 | 29.0 | 8.28 | 0.40 | 43.67 | 59.0 | 19.0 | 21.7 | 467.10 | 8,500 | 2,700 | 0.32 | ND | ND | ND |
| 26 | 29.0 | 29.0 | 8.09 | 0.40 | 44.07 | 56.5 | 18.5 | 24.5 | 492.82 | 8,800 | 2,550 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.99 | 0.20 | 44.27 | 57.3 | 18.3 | 24.2 | 397.29 | 8,260 | 2,100 | 0.25 | 832.93 | 691.97 | 0.00 |
| 28 | 29.0 | 29.0 | 8.05 | 0.00 | 44.27 | 56.6 | 17.9 | 25.3 | 260.53 | 8,800 | 1,920 | 0.22 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)
[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)
[c] Titration method (AOAC International, 2000)
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)
ND, Not determined
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 8** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลังที่มี** Total solids 1.5% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester **ที่มีปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 7.06 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4,749.51 | 1,200 | 750 | 0.63 | 0.00 | 244.72 | 122.18 |
| 1 | 31.0 | 31.0 | 6.84 | 5.76 | 5.76 | 8.7 | 90.8 | 0.2 | 4,187.85 | 3,100 | 2,100 | 0.68 | ND | ND | ND |
| 2 | 31.0 | 31.0 | 7.42 | 8.10 | 13.86 | 13.0 | 86.4 | 0.2 | 4,426.66 | 5,100 | 3,450 | 0.68 | ND | ND | ND |
| 3 | 30.0 | 30.0 | 7.27 | 0.81 | 14.67 | 6.9 | 82.5 | 0.2 | 3,413.59 | 6,300 | 3,930 | 0.62 | 1,638.92 | 1,203.07 | 1,501.71 |
| 4 | 30.0 | 30.0 | 7.25 | 3.06 | 17.73 | 18.1 | 81.3 | 0.2 | 3,348.27 | 6,400 | 4,800 | 0.75 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 7.20 | 0.32 | 18.05 | 20.1 | 78.9 | 0.2 | 2,784.88 | 6,900 | 4,710 | 0.68 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.21 | 2.30 | 20.35 | 21.5 | 77.9 | 0.1 | 2,458.28 | 3,700 | 5,100 | 1.38 | 1,904.72 | 1,363.15 | 1,402.97 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 6.92 | 1.67 | 22.02 | 27.3 | 71.2 | 1.0 | 1,805.08 | 5,760 | 5,700 | 0.99 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 6.91 | 1.17 | 23.19 | 34.5 | 61.7 | 3.5 | 2,008.90 | 6,200 | 5,910 | 0.95 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.16 | 1.40 | 24.59 | 39.6 | 55.0 | 5.1 | 1,655.76 | 6,200 | 5,760 | 0.93 | 2,648.21 | 1,481.98 | 1,868.28 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 7.30 | 1.20 | 25.79 | 41.9 | 48.1 | 9.7 | 1,376.11 | 6,500 | 5,850 | 0.90 | ND | ND | ND |
| 11 | 31.0 | 30.0 | 7.21 | 1.20 | 26.99 | 45.9 | 41.2 | 12.4 | 959.70 | 6,000 | 5,700 | 0.95 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.25 | 1.40 | 28.39 | 51.6 | 36.3 | 11.8 | 831.10 | 6,400 | 5,700 | 0.89 | 1,670.26 | 1,585.03 | 1,634.53 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.29 | 1.20 | 29.59 | 57.3 | 30.9 | 11.5 | 1,484.30 | 6,400 | 5,550 | 0.87 | ND | ND | ND |
| 14 | 30.5 | 30.0 | 7.40 | 1.40 | 30.99 | 58.2 | 26.9 | 12.5 | 1,935.41 | 5,500 | 4,500 | 0.82 | ND | ND | ND |
| 15 | 31.0 | 31.0 | 7.53 | 1.20 | 32.19 | 62.0 | 24.2 | 13.3 | 1,052.24 | 5,800 | 4,500 | 0.78 | 1,419.92 | 1,873.98 | 1,634.57 |
| 16 | 31.0 | 30.0 | 7.41 | 1.20 | 33.39 | 63.7 | 22.2 | 13.6 | 1,223.71 | 6,480 | 4,500 | 0.69 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.69 | 1.20 | 34.59 | 66.6 | 21.8 | 11.2 | 1,087.76 | 6,640 | 4,500 | 0.68 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.85 | 1.40 | 35.99 | 66.6 | 20.9 | 10.9 | 1,796.61 | 6,800 | 4,200 | 0.62 | 1,548.60 | 2,086.95 | 1,494.09 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 8** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.5% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.87 | 2.40 | 38.39 | 67.9 | 20.9 | 13.0 | 1,598.61 | 7,040 | 4,050 | 0.58 | ND | ND | ND |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 7.92 | 1.60 | 39.99 | 69.7 | 20.9 | 13.0 | 1,277.13 | 7,400 | 3,930 | 0.53 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 7.87 | 1.20 | 41.19 | 67.1 | 20.9 | 11.6 | 1,038.71 | 7,260 | 3,750 | 0.52 | 1,416.68 | 3,018.65 | 1,294.62 |
| 22 | 30.0 | 29.0 | 7.89 | 1.00 | 42.19 | 64.7 | 20.0 | 15.1 | 618.56 | 7,860 | 3,990 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 7.86 | 1.20 | 43.39 | 65.0 | 19.1 | 15.6 | 522.21 | 7,420 | 3,570 | 0.48 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 8.07 | 1.20 | 44.59 | 62.5 | 18.2 | 15.6 | 514.86 | 8,000 | 3,690 | 0.46 | 881.77 | 0.00 | 0.00 |
| 25 | 29.0 | 29.0 | 8.11 | 1.00 | 45.59 | 67.7 | 17.8 | 14.1 | 499.76 | 8,100 | 3,600 | 0.44 | ND | ND | ND |
| 26 | 29.0 | 29.0 | 8.06 | 0.80 | 46.39 | 66.0 | 17.4 | 16.2 | 434.03 | 8,300 | 3,480 | 0.42 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.96 | 0.60 | 46.99 | 65.6 | 17.3 | 16.7 | 397.70 | 8,500 | 3,390 | 0.40 | 758.69 | 0.00 | 0.00 |
| 28 | 29.0 | 28.5 | 8.01 | 0.40 | 47.39 | 65.1 | 17.5 | 16.9 | 496.49 | 8,460 | 3,180 | 0.38 | ND | ND | ND |
| 29 | 29.0 | 29.0 | 8.06 | 0.50 | 47.89 | 65.0 | 18.1 | 16.7 | 474.04 | 8,800 | 3,120 | 0.35 | ND | ND | ND |
| 30 | 29.0 | 29.0 | 7.96 | 0.40 | 48.29 | 64.3 | 18.0 | 17.4 | 434.03 | 9,000 | 3,030 | 0.34 | 573.58 | 2269.78 | 0.00 |
| 31 | 30.0 | 29.5 | 8.01 | 0.40 | 48.69 | 61.6 | 17.9 | 20.2 | 391.98 | 9,020 | 2,970 | 0.33 | ND | ND | ND |
| 32 | 29.0 | 29.0 | 8.10 | 0.20 | 48.89 | 62.6 | 18.3 | 18.9 | 362.18 | 8,900 | 2,850 | 0.32 | ND | ND | ND |
| 33 | 29.0 | 29.0 | 8.08 | 0.20 | 49.09 | 64.5 | 17.8 | 17.2 | 285.02 | 8,320 | 2,400 | 0.29 | 255.42 | 1572.79 | 0.00 |
| 34 | 30.0 | 29.8 | 8.01 | 0.00 | 49.09 | 65.6 | 18.0 | 16.2 | 152.75 | 8,400 | 2,370 | 0.28 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 9** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 2.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 6.85 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 7,147.88 | 1,260 | 600 | 0.48 | 60.83 | 244.72 | 100.99 |
| 1 | 31.0 | 31.0 | 6.68 | 7.65 | 7.65 | 7.0 | 92.5 | 0.2 | 6,024.98 | 3,000 | 2,760 | 0.92 | ND | ND | ND |
| 2 | 31.0 | 31.0 | 7.02 | 8.69 | 16.34 | 9.9 | 89.6 | 0.2 | 4,128.02 | 5,000 | 4,350 | 0.87 | ND | ND | ND |
| 3 | 30.0 | 30.0 | 7.18 | 6.80 | 23.14 | 13.7 | 85.7 | 0.2 | 3,482.99 | 7,000 | 5,100 | 0.73 | 2,396.70 | 1,961.46 | 1,739.59 |
| 4 | 30.0 | 30.0 | 6.84 | 4.05 | 27.19 | 16.7 | 82.6 | 0.1 | 2,225.58 | 6,900 | 5,550 | 0.80 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 6.55 | 2.93 | 30.12 | 19.3 | 79.9 | 0.2 | 2,650.16 | 6,900 | 5,940 | 0.86 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 5.38 | 1.62 | 31.74 | 21.4 | 78.1 | 0.1 | 2,515.44 | 2,600 | 3,600 | 1.38 | 3,169.21 | 2,180.40 | 1,749.20 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 6.37 | 3.20 | 34.94 | 11.9 | 87.5 | 0.1 | 1,560.13 | 5,500 | 7,050 | 1.28 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 6.42 | 1.58 | 36.52 | 20.6 | 78.9 | 0.1 | 1,572.38 | 5,600 | 7,740 | 1.38 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 6.56 | 2.40 | 38.92 | 27.6 | 68.9 | 3.2 | 1,976.24 | 5,840 | 7,890 | 1.35 | 4,179.74 | 3,064.17 | 2,876.58 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 6.65 | 2.20 | 41.12 | 34.3 | 59.0 | 6.4 | 2,553.91 | 5,600 | 7,800 | 1.39 | ND | ND | ND |
| 11 | 31.0 | 30.0 | 6.62 | 2.00 | 43.12 | 39.9 | 50.3 | 9.5 | 1,935.41 | 5,700 | 7,650 | 1.34 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 6.72 | 2.00 | 45.12 | 46.3 | 43.3 | 9.7 | 1,661.89 | 5,600 | 7,500 | 1.34 | 3,296.02 | 2,680.65 | 2,518.60 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 6.89 | 2.20 | 47.32 | 56.2 | 35.3 | 8.0 | 2,087.16 | 7,000 | 7,500 | 1.07 | ND | ND | ND |
| 14 | 30.5 | 30.0 | 7.13 | 2.00 | 49.32 | 61.7 | 30.0 | 8.1 | 1,714.83 | 5,760 | 6,780 | 1.18 | ND | ND | ND |
| 15 | 31.0 | 31.0 | 7.28 | 2.00 | 51.32 | 62.7 | 24.6 | 12.3 | 1,235.96 | 6,500 | 4,710 | 0.72 | 2,406.29 | 3,266.99 | 3,109.24 |
| 16 | 31.0 | 30.0 | 7.29 | 2.00 | 53.32 | 64.4 | 21.0 | 14.1 | 986.11 | 6,000 | 5,250 | 0.88 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.64 | 2.00 | 55.32 | 70.0 | 19.3 | 10.4 | 1,450.23 | 6,200 | 5,070 | 0.82 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.84 | 2.00 | 57.32 | 70.6 | 17.9 | 11.2 | 1,487.79 | 7,040 | 5,400 | 0.77 | 1,442.95 | 3,041.39 | 2,856.69 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 9** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 2.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.86 | 1.90 | 59.22 | 70.9 | 17.5 | 11.2 | 1,278.76 | 6,400 | 4,800 | 0.75 | ND | ND | ND |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 7.92 | 1.80 | 61.02 | 70.2 | 17.8 | 11.6 | 1,194.66 | 6,800 | 4,860 | 0.71 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 7.91 | 1.80 | 62.82 | 71.0 | 18.3 | 10.4 | 1,055.04 | 7,160 | 4,980 | 0.70 | 1,071.84 | 1,009.82 | 0.00 |
| 22 | 30.0 | 29.0 | 7.78 | 1.60 | 64.42 | 69.0 | 18.8 | 11.9 | 850.85 | 7,100 | 4,800 | 0.68 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 7.73 | 1.20 | 65.62 | 69.3 | 19.1 | 11.3 | 745.12 | 7,600 | 4,800 | 0.63 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 7.98 | 1.00 | 66.62 | 68.2 | 18.7 | 12.8 | 718.17 | 7,800 | 4,740 | 0.61 | 830.17 | 1,359.47 | 0.00 |
| 25 | 29.0 | 29.0 | 8.15 | 1.00 | 67.62 | 69.2 | 18.5 | 11.9 | 647.55 | 7,360 | 4,380 | 0.60 | ND | ND | ND |
| 26 | 29.0 | 29.0 | 7.98 | 0.90 | 68.52 | 65.7 | 17.7 | 16.2 | 609.17 | 7,640 | 4,470 | 0.59 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.90 | 0.80 | 69.32 | 66.5 | 17.4 | 15.6 | 577.33 | 8,160 | 4,560 | 0.56 | 773.94 | 3,252.07 | 0.00 |
| 28 | 29.0 | 28.5 | 8.03 | 0.60 | 69.92 | 66.0 | 17.3 | 16.3 | 675.72 | 8,500 | 4,050 | 0.48 | ND | ND | ND |
| 29 | 29.0 | 29.0 | 7.98 | 0.60 | 70.52 | 64.1 | 17.4 | 18.4 | 547.52 | 8,360 | 3,780 | 0.45 | ND | ND | ND |
| 30 | 29.0 | 29.0 | 8.08 | 0.40 | 70.92 | 64.8 | 17.4 | 17.6 | 510.78 | 9,120 | 4,050 | 0.44 | 520.19 | 3,231.19 | 0.00 |
| 31 | 30.0 | 29.5 | 7.91 | 0.40 | 71.32 | 63.8 | 18.2 | 17.8 | 563.85 | 8,140 | 3,600 | 0.44 | ND | ND | ND |
| 32 | 29.0 | 29.0 | 8.02 | 0.20 | 71.52 | 63.2 | 19.0 | 17.6 | 527.52 | 8,200 | 3,360 | 0.41 | ND | ND | ND |
| 33 | 29.0 | 29.0 | 7.96 | 0.20 | 71.72 | 63.9 | 18.9 | 16.7 | 391.17 | 8,500 | 3,420 | 0.40 | 394.10 | 3,777.35 | 0.00 |
| 34 | 30.0 | 29.0 | 8.01 | 0.00 | 71.72 | 62.3 | 19.9 | 17.4 | 305.02 | 8,800 | 3,360 | 0.38 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 10** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลังที่มี** Total solids 3.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 6.63 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 9,892.24 | 1,014 | 720 | 0.71 | 0.00 | 203.60 | 130.20 |
| 1 | 31.0 | 30.0 | 5.81 | 3.84 | 3.84 | ND | ND | ND | 8,132.47 | 1,620 | 3,240 | 2.00 | ND | ND | ND |
| 2 | 30.0 | 30.0 | 5.62 | 9.04 | 12.88 | 13.4 | 84.9 | 1.6 | 5,366.43 | 2,961 | 4,590 | 1.55 | ND | ND | ND |
| 3 | 29.0 | 29.0 | 6.09 | 14.73 | 27.61 | 12.8 | 86.2 | 0.8 | 4,527.89 | 4,409 | 5,820 | 1.32 | 2,426.40 | 1,901.30 | 1,540.50 |
| 4 | 29.0 | 29.0 | 6.42 | 5.10 | 32.71 | 9.9 | 89.9 | 0.1 | 2,893.25 | 5,309 | 7,380 | 1.39 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 6.66 | 1.58 | 34.29 | 11.0 | 88.6 | 0.2 | 3,445.21 | 6,802 | 7,890 | 1.16 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.48 | 2.40 | 36.69 | 12.6 | 86.8 | 0.1 | 3,270.07 | 7,500 | 9,000 | 1.20 | 3,012.20 | 2,020.30 | 1,659.10 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 6.55 | 1.20 | 37.89 | 13.5 | 86.1 | 0.2 | 2,028.17 | 7,676 | 10,440 | 1.36 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.12 | 1.00 | 38.89 | 14.5 | 85.3 | 0.1 | 2,044.09 | 9,612 | 9,900 | 1.03 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.23 | 1.50 | 40.39 | 16.7 | 83.0 | 0.2 | 2,569.11 | 9,658 | 11,010 | 1.14 | 4,051.54 | 2,812.14 | 2,562.50 |
| 10 | 29.0 | 29.0 | 7.17 | 1.20 | 41.59 | 21.8 | 77.8 | 0.2 | 3,320.08 | 5,612 | 7,800 | 1.39 | ND | ND | ND |
| 11 | 29.0 | 29.0 | 7.36 | 1.00 | 42.59 | 26.6 | 70.6 | 2.3 | 2,516.03 | 5,709 | 7,650 | 1.34 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.53 | 1.25 | 43.84 | 30.5 | 63.6 | 5.9 | 2,160.46 | 5,597 | 7,500 | 1.34 | 3,129.10 | 2,435.77 | 2,438.65 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.70 | 1.10 | 44.94 | 30.0 | 54.1 | 15.1 | 2,713.31 | 7,009 | 7,500 | 1.07 | ND | ND | ND |
| 14 | 30.0 | 30.0 | 7.53 | 1.22 | 46.16 | 45.9 | 40.6 | 13.5 | 2,229.28 | 5,746 | 6,780 | 1.18 | ND | ND | ND |
| 15 | 29.0 | 29.0 | 7.48 | 1.20 | 47.36 | 52.8 | 34.3 | 12.6 | 2,235.96 | 7,293 | 6,710 | 0.92 | 3,406.29 | 2,266.99 | 2,109.24 |
| 16 | 30.0 | 30.0 | 7.65 | 1.10 | 48.46 | 54.5 | 30.7 | 14.5 | 1,986.56 | 6,888 | 6,750 | 0.98 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.70 | 1.04 | 49.50 | 57.0 | 30.2 | 12.5 | 1,950.64 | 7,283 | 6,700 | 0.92 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.78 | 1.00 | 50.50 | 56.8 | 30.6 | 12.3 | 1,987.44 | 6,667 | 6,600 | 0.99 | 3,442.95 | 2,041.39 | 1,856.69 |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.79 | 1.90 | 52.40 | 58.6 | 28.9 | 12.2 | 1,978.65 | 6,211 | 5,900 | 0.95 | ND | ND | ND |
| 20 | 30.0 | 30.0 | 7.82 | 1.80 | 54.20 | 60.6 | 26.6 | 12.5 | 1,994.55 | 6,341 | 5,770 | 0.91 | ND | ND | ND |
| 21 | 30.0 | 30.0 | 7.89 | 1.80 | 56.00 | 60.0 | 27.1 | 12.6 | 1,955.70 | 6,533 | 5,880 | 0.90 | 2,071.84 | 1,009.82 | 215.00 |
| 22 | 30.0 | 30.0 | 7.88 | 1.60 | 57.60 | 59.0 | 27.9 | 12.8 | 1,850.90 | 5,816 | 5,700 | 0.98 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)
[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)
[c] Titration method (AOAC International, 2000)
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)
ND, Not determined
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 11** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลังที่มี** Total solids 4.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 6.67 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 10,551.40 | 840 | 840 | 1.00 | 40.83 | 222.30 | 98.80 |
| 1 | 31.0 | 30.0 | 5.27 | 3.05 | 3.05 | ND | ND | ND | 9,942.47 | 1,278 | 3,360 | 2.63 | ND | ND | ND |
| 2 | 30.0 | 30.0 | 5.55 | 8.93 | 11.98 | 6.0 | 76.1 | 17.7 | 7,017.63 | 2,833 | 5,100 | 1.80 | ND | ND | ND |
| 3 | 29.0 | 29.0 | 5.71 | 4.62 | 16.60 | 5.5 | 74.6 | 19.1 | 5,921.08 | 2,896 | 6,660 | 2.30 | 2,124.44 | 1,561.47 | 1,236.56 |
| 4 | 29.0 | 29.0 | 5.75 | 3.20 | 19.80 | 6.2 | 78.8 | 14.8 | 3,783.49 | 4,703 | 8,700 | 1.85 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 6.15 | 2.58 | 22.38 | 4.1 | 83.5 | 11.7 | 4,505.27 | 6,880 | 9,150 | 1.33 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.23 | 2.40 | 24.78 | 3.7 | 84.3 | 11.2 | 4,276.25 | 7,393 | 10,350 | 1.40 | 3,169.21 | 2,180.40 | 1,749.20 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 6.18 | 2.20 | 26.98 | 5.3 | 93.7 | 10.2 | 2,652.22 | 8,019 | 12,750 | 1.59 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 6.67 | 1.50 | 28.48 | 4.3 | 95.4 | 10.1 | 2,673.05 | 10,000 | 13,200 | 1.32 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 6.87 | 1.20 | 29.68 | 7.6 | 91.8 | 10.1 | 3,359.61 | 9,073 | 11,250 | 1.24 | 3,880.74 | 2,198.88 | 2,376.60 |
| 10 | 29.0 | 29.0 | 7.03 | 1.20 | 30.88 | 11.8 | 79.7 | 6.1 | 4,341.65 | 4,892 | 6,800 | 1.39 | ND | ND | ND |
| 11 | 29.0 | 29.0 | 6.98 | 1.50 | 32.38 | 17.9 | 91.4 | 10.2 | 3,290.20 | 4,963 | 6,650 | 1.34 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.33 | 1.20 | 33.58 | 19.9 | 89.9 | 10.2 | 2,825.21 | 4,851 | 6,500 | 1.34 | 2,090.02 | 1,780.67 | 2,018.50 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.07 | 1.30 | 34.88 | 20.1 | 67.9 | 11.5 | 3,548.17 | 6,075 | 6,500 | 1.07 | ND | ND | ND |
| 14 | 31.0 | 30.0 | 7.13 | 1.10 | 35.98 | 20.8 | 67.0 | 11.7 | 2,915.21 | 4,898 | 5,780 | 1.18 | ND | ND | ND |
| 15 | 30.0 | 30.0 | 7.20 | 1.15 | 37.13 | 22.7 | 64.8 | 12.0 | 2,835.90 | 5,143 | 5,760 | 1.12 | 2,071.05 | 2,865.90 | 2,909.40 |
| 16 | 30.0 | 30.0 | 7.23 | 1.10 | 38.23 | 24.5 | 62.9 | 12.1 | 2,986.45 | 5,653 | 5,540 | 0.98 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.34 | 1.10 | 39.33 | 30.2 | 57.9 | 11.4 | 2,750.64 | 5,946 | 5,470 | 0.92 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.25 | 1.20 | 40.53 | 30.8 | 57.2 | 11.5 | 2,487.60 | 5,520 | 5,410 | 0.98 | 1,980.60 | 2,545.90 | 2,832.90 |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.65 | 1.30 | 41.83 | 36.5 | 51.7 | 11.3 | 2,278.55 | 6,212 | 5,280 | 0.85 | ND | ND | ND |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 7.74 | 1.18 | 43.01 | 38.7 | 49.4 | 11.4 | 2,194.65 | 5,724 | 4,980 | 0.87 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 7.78 | 1.19 | 44.20 | 37.1 | 52.3 | 10.1 | 2,055.75 | 5,400 | 4,860 | 0.90 | 1,880.40 | 1,469.80 | 1,605.01 |
| 22 | 29.0 | 29.0 | 7.81 | 1.10 | 45.30 | 36.9 | 51.0 | 11.6 | 1,850.50 | 5,640 | 4,850 | 0.86 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)
[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)
[c] Titration method (AOAC International, 2000)
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)
ND, Not determined
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 12** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.088% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 7.36 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2,299.06 | 1,000 | 1,200 | 1.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 31.0 | 6.98 | 3.42 | 3.42 | 6.9 | 92.3 | 0.2 | 2,045.95 | 2,800 | 1,650 | 0.59 | ND | ND | ND |
| 2 | 31.0 | 31.0 | 7.52 | 7.02 | 10.44 | 16.0 | 83.3 | 0.1 | 2,062.28 | 4,620 | 2,550 | 0.55 | ND | ND | ND |
| 3 | 30.0 | 30.0 | 7.68 | 3.83 | 14.27 | 19.0 | 80.5 | 0.2 | 1,862.24 | 6,300 | 2,550 | 0.40 | 529.13 | 586.51 | 299.00 |
| 4 | 30.0 | 30.0 | 7.57 | 4.50 | 18.77 | 18.7 | 79.9 | 0.8 | 1,429.49 | 6,900 | 3,450 | 0.50 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 7.73 | 2.48 | 21.25 | 21.5 | 75.3 | 2.7 | 1,939.50 | 7,200 | 3,450 | 0.48 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.86 | 1.53 | 22.78 | 26.1 | 66.8 | 6.3 | 1,133.20 | 5,000 | 4,800 | 0.96 | 1,187.47 | 554.39 | 625.95 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.45 | 1.13 | 23.91 | 28.9 | 57.5 | 13.2 | 1,306.71 | 6,400 | 3,900 | 0.61 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.43 | 0.77 | 24.68 | 32.7 | 52.2 | 14.7 | 1,323.04 | 6,400 | 3,990 | 0.62 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.49 | 0.72 | 25.40 | 35.5 | 47.1 | 16.8 | 1,355.70 | 6,500 | 4,050 | 0.62 | 1,296.91 | 507.12 | 705.36 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 7.57 | 0.63 | 26.03 | 38.4 | 42.5 | 18.4 | 1,178.11 | 6,600 | 3,810 | 0.58 | ND | ND | ND |
| 11 | 31.0 | 30.0 | 7.47 | 0.58 | 26.61 | 41.6 | 39.8 | 18.2 | 1,478.46 | 6,700 | 3,900 | 0.58 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.38 | 0.59 | 27.20 | 42.4 | 36.2 | 20.8 | 1,289.85 | 6,800 | 3,900 | 0.57 | 949.31 | 902.11 | 1,062.25 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.35 | 0.72 | 27.92 | 46.0 | 31.8 | 21.7 | 1,149.00 | 6,900 | 3,960 | 0.57 | ND | ND | ND |
| 14 | 29.0 | 29.0 | 7.59 | 0.63 | 28.55 | 46.0 | 28.8 | 24.7 | 817.09 | 6,840 | 3,540 | 0.52 | ND | ND | ND |
| 15 | 30.5 | 30.5 | 7.62 | 0.77 | 29.32 | 50.0 | 27.3 | 22.2 | 884.45 | 7,000 | 3,600 | 0.51 | 1,006.12 | 865.07 | 1,166.58 |
| 16 | 31.0 | 31.0 | 7.64 | 0.76 | 30.08 | 52.0 | 25.8 | 21.8 | 1,370.21 | 7,100 | 3,630 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 17 | 31.0 | 30.0 | 7.76 | 1.08 | 31.16 | 54.1 | 25.2 | 20.1 | 1,224.06 | 7,000 | 3,240 | 0.46 | ND | ND | ND |
| 18 | 30.0 | 30.0 | 7.93 | 0.24 | 31.40 | 56.1 | 23.6 | 19.7 | 1,433.08 | 7,200 | 3,150 | 0.44 | 1,584.04 | 1,187.65 | 130.08 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 12** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.088% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.86 | 0.26 | 31.66 | 59.1 | 22.0 | 18.2 | 1,245.29 | 7,300 | 2,400 | 0.33 | ND | ND | ND |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 8.04 | 0.20 | 31.86 | 60.0 | 22.0 | 17.5 | 659.79 | 7,700 | 2,760 | 0.36 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 8.03 | 0.20 | 32.06 | 60.3 | 21.6 | 17.7 | 585.49 | 7,400 | 2,850 | 0.39 | 1,387.62 | 930.90 | 93.74 |
| 22 | 29.0 | 29.0 | 8.02 | 0.16 | 32.22 | 60.9 | 20.7 | 18.2 | 823.16 | 8,200 | 3,090 | 0.38 | ND | ND | ND |
| 23 | 30.0 | 29.0 | 7.96 | 0.18 | 32.40 | 60.1 | 20.0 | 18.8 | 409.54 | 8,000 | 3,090 | 0.39 | ND | ND | ND |
| 24 | 29.0 | 29.0 | 8.11 | 0.12 | 32.52 | 59.2 | 19.5 | 20.9 | 394.84 | 8,480 | 2,520 | 0.30 | 885.77 | 852.05 | 82.03 |
| 25 | 30.0 | 30.0 | 8.19 | 0.08 | 32.60 | 59.7 | 19.3 | 20.7 | 314.41 | 8,400 | 2,400 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 26 | 29.0 | 29.0 | 8.19 | 0.04 | 32.64 | 58.1 | 18.8 | 22.9 | 286.65 | 8,440 | 2,400 | 0.28 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.99 | 0.04 | 32.68 | 58.1 | 18.1 | 23.3 | 205.00 | 8,320 | 2,250 | 0.27 | 693.25 | 1,139.53 | 0.00 |
| 28 | 29.0 | 29.0 | 8.08 | 0.00 | 32.68 | 57.2 | 17.3 | 25.0 | 378.98 | 8,860 | 2,250 | 0.25 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)
[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)
[c] Titration method (AOAC International, 2000)
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)
ND, Not determined
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 13** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมโพแทสเซียมไนเตรท 0.142% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 7.26 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2,290.90 | 1,100 | 1,500 | 1.36 | 60.83 | 244.72 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 31.0 | 7.20 | 2.30 | 2.30 | 23.1 | 61.2 | 14.9 | 2,172.51 | 3,300 | 1,350 | 0.41 | ND | ND | ND |
| 2 | 31.0 | 31.0 | 7.46 | 8.37 | 10.67 | 0.0 | 99.3 | 0.1 | 1,490.73 | 4,800 | 2,940 | 0.61 | ND | ND | ND |
| 3 | 30.0 | 30.0 | 7.66 | 4.32 | 14.99 | 0.0 | 99.9 | 0.1 | 935.51 | 7,400 | 3,750 | 0.51 | 1,165.44 | 936.16 | 172.06 |
| 4 | 30.0 | 30.0 | 7.71 | 1.17 | 16.16 | 6.1 | 93.1 | 0.1 | 739.55 | 8,000 | 3,960 | 0.50 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 7.80 | 1.53 | 17.69 | 18.2 | 81.2 | 0.2 | 1,490.42 | 8,200 | 4,050 | 0.49 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.80 | 2.43 | 20.12 | 22.2 | 76.8 | 0.5 | 986.23 | 5,500 | 5,700 | 1.04 | 1,634.37 | 844.81 | 436.52 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.26 | 1.94 | 22.06 | 21.5 | 77.6 | 0.7 | 1,020.93 | 6,780 | 4,950 | 0.73 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.33 | 0.77 | 22.83 | 23.5 | 66.2 | 9.8 | 939.28 | 6,600 | 4,800 | 0.73 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.41 | 0.76 | 23.59 | 29.4 | 60.6 | 9.6 | 924.99 | 6,700 | 4,800 | 0.72 | 1,699.39 | 433.39 | 596.08 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 7.45 | 0.54 | 24.13 | 34.2 | 54.4 | 11.0 | 1,501.73 | 7,000 | 4,950 | 0.71 | ND | ND | ND |
| 11 | 31.0 | 30.0 | 7.36 | 0.22 | 24.35 | 38.5 | 49.7 | 11.2 | 2,207.18 | 6,400 | 4,500 | 0.70 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.30 | 0.41 | 24.76 | 42.9 | 45.5 | 11.1 | 1,916.92 | 6,600 | 4,650 | 0.70 | 1,738.39 | 1192.88 | 843.37 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.34 | 0.45 | 25.21 | 46.8 | 39.1 | 13.7 | 1,196.77 | 6,840 | 4,620 | 0.68 | ND | ND | ND |
| 14 | 30.5 | 30.0 | 7.52 | 0.90 | 26.11 | 47.7 | 35.3 | 16.6 | 1,040.00 | 6,900 | 4,500 | 0.65 | ND | ND | ND |
| 15 | 31.0 | 31.0 | 7.53 | 0.58 | 26.69 | 47.2 | 31.4 | 21.0 | 1,582.50 | 7,200 | 4,440 | 0.62 | 1,839.94 | 1,298.57 | 689.92 |
| 16 | 31.0 | 30.0 | 7.56 | 3.38 | 30.07 | 50.0 | 28.6 | 20.9 | 1,064.02 | 7,200 | 4,260 | 0.59 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.78 | 0.22 | 30.29 | 55.5 | 27.2 | 16.6 | 810.09 | 7,400 | 4,050 | 0.55 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.93 | 0.20 | 30.49 | 57.0 | 24.9 | 17.6 | 677.82 | 7,600 | 3,840 | 0.51 | 1,515.32 | 1,251.22 | 616.14 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)
[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)
[c] Titration method (AOAC International, 2000)
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)
ND, Not determined
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 13** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมโพแทสเซียมไนเตรท 0.142% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.88 | 0.18 | 30.67 | 59.6 | 22.8 | 17.1 | 670.82 | 7,300 | 3,600 | 0.49 | ND | ND | ND |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 8.08 | 0.16 | 30.83 | 59.6 | 21.8 | 18.2 | 531.60 | 8,000 | 3,720 | 0.47 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 8.05 | 0.14 | 30.97 | 61.5 | 21.0 | 17.1 | 565.90 | 8,200 | 3,660 | 0.45 | 1,148.01 | 801.45 | 0.00 |
| 22 | 30.0 | 29.0 | 8.00 | 0.12 | 31.09 | 61.3 | 20.2 | 17.9 | 581.82 | 8,000 | 3,450 | 0.43 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 7.92 | 0.12 | 31.21 | 62.4 | 19.8 | 17.3 | 467.10 | 8,600 | 3,540 | 0.41 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 8.11 | 0.10 | 31.31 | 63.6 | 19.7 | 16.4 | 445.05 | 8,840 | 3,540 | 0.40 | 1,082.88 | 1,164.05 | 0.00 |
| 25 | 29.0 | 29.0 | 8.28 | 0.08 | 31.39 | 63.5 | 19.3 | 16.9 | 396.88 | 9,000 | 3,450 | 0.38 | ND | ND | ND |
| 26 | 29.0 | 29.0 | 8.12 | 0.06 | 31.45 | 62.6 | 19.1 | 17.8 | 326.66 | 8,600 | 3,150 | 0.37 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.97 | 0.04 | 31.49 | 62.2 | 18.5 | 18.8 | 272.36 | 8,800 | 3,120 | 0.35 | 800.69 | 1,047.63 | 0.00 |
| 28 | 29.0 | 29.0 | 8.07 | 0.00 | 31.49 | 62.4 | 18.1 | 18.7 | 138.87 | 9,200 | 3,000 | 0.33 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ตารางผนวกที่ 14** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.02% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 30.0 | 29.0 | 7.25 | 0.00 | 0.00 | ND | ND | ND | 2,744.06 | 1,220 | 750 | 0.61 | 60.83 | 244.72 | 0.00 |
| 1 | 28.0 | 28.0 | 6.91 | 0.50 | 0.50 | 15.6 | 31.2 | 50.5 | 1,760.17 | 1,760 | 900 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 2 | 29.0 | 29.0 | 6.66 | 4.10 | 4.60 | 22.2 | 73.8 | 3.5 | 2,282.73 | 2,500 | 1,830 | 0.73 | ND | ND | ND |
| 3 | 29.0 | 29.0 | 7.11 | 5.31 | 9.91 | 22.6 | 76.5 | 0.2 | 2,560.34 | 3,700 | 2,550 | 0.69 | 1,376.57 | 642.07 | 613.71 |
| 4 | 30.0 | 29.0 | 6.96 | 4.28 | 14.19 | 24.6 | 74.5 | 0.1 | 1,990.53 | 5,100 | 3,630 | 0.71 | ND | ND | ND |
| 5 | 31.0 | 30.0 | 7.07 | 3.78 | 17.97 | 22.0 | 77.3 | 0.2 | 1,949.70 | 5,500 | 3,900 | 0.71 | ND | ND | ND |
| 6 | 30.0 | 30.0 | 7.04 | 1.17 | 19.14 | 28.9 | 70.3 | 0.4 | 1,349.57 | 5,840 | 3,930 | 0.67 | 3,369.38 | 2,388.39 | 1,490.47 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.20 | 1.22 | 20.36 | 32.3 | 64.5 | 2.7 | 1,559.82 | 6,200 | 3,990 | 0.64 | ND | ND | ND |
| 8 | 30.0 | 30.0 | 7.20 | 1.13 | 21.49 | 35.4 | 59.4 | 4.8 | 1,504.71 | 6,300 | 4,050 | 0.64 | ND | ND | ND |
| 9 | 29.0 | 29.0 | 7.21 | 1.04 | 22.53 | 36.9 | 54.8 | 8.0 | 1,210.77 | 6,360 | 4,020 | 0.63 | 1,516.84 | 928.22 | 871.04 |
| 10 | 30.0 | 29.5 | 7.41 | 0.80 | 23.33 | 40.8 | 49.7 | 9.1 | 1,212.81 | 7,000 | 4,320 | 0.62 | ND | ND | ND |
| 11 | 29.0 | 29.0 | 7.30 | 0.59 | 23.92 | 44.5 | 46.8 | 8.3 | 1,304.67 | 7,000 | 4,140 | 0.59 | ND | ND | ND |
| 12 | 28.0 | 28.0 | 7.37 | 0.36 | 24.28 | 45.0 | 43.1 | 11.6 | 384.06 | 7,100 | 4,110 | 0.58 | 1,411.50 | 1,131.66 | 717.64 |
| 13 | 30.0 | 30.0 | 7.36 | 0.77 | 25.05 | 45.0 | 39.5 | 15.3 | 584.11 | 7,000 | 3,900 | 0.56 | ND | ND | ND |
| 14 | 29.0 | 29.0 | 7.44 | 0.86 | 25.91 | 47.4 | 36.5 | 15.8 | 829.06 | 7,320 | 3,750 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 15 | 29.0 | 29.0 | 7.61 | 0.86 | 26.77 | 50.0 | 33.5 | 16.2 | 739.93 | 7,420 | 3,780 | 0.51 | 1,521.85 | 1,115.74 | 279.39 |
| 16 | 29.0 | 29.0 | 7.64 | 0.95 | 27.72 | 51.0 | 30.7 | 17.9 | 750.49 | 7,400 | 3,750 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 17 | 29.0 | 29.0 | 7.66 | 0.99 | 28.71 | 52.5 | 28.9 | 18.1 | 378.10 | 7,500 | 3,390 | 0.45 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.59 | 0.65 | 29.36 | 54.4 | 27.4 | 17.7 | 434.03 | 7,300 | 3,360 | 0.46 | 2,199.34 | 1,137.4 | 253.58 |
| 19 | 27.0 | 27.0 | 7.65 | 0.54 | 29.90 | 55.7 | 26.1 | 17.9 | 390.76 | 7,100 | 3,360 | 0.47 | ND | ND | ND |
| 20 | 28.0 | 28.0 | 7.80 | 0.43 | 30.33 | 54.0 | 25.2 | 20.4 | 376.20 | 7,500 | 3,300 | 0.44 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 15** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.08% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 10 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 30.0 | 29.0 | 7.17 | 0.00 | 0.00 | ND | ND | ND | 2,184.75 | 1,200 | 750 | 0.63 | 36.11 | 290.39 | 0.00 |
| 1 | 28.0 | 28.0 | 6.78 | 1.44 | 1.44 | 16.2 | 38.2 | 45.1 | 1,992.88 | 2,000 | 960 | 0.48 | ND | ND | ND |
| 2 | 29.0 | 29.0 | 6.63 | 10.88 | 12.32 | 18.7 | 78.4 | 2.5 | 2,539.93 | 2,520 | 1,950 | 0.77 | ND | ND | ND |
| 3 | 29.0 | 29.0 | 7.06 | 7.52 | 19.84 | 24.6 | 74.7 | 0.2 | 3,131.89 | 4,000 | 2,850 | 0.71 | 1,197.06 | 1,280.63 | 414.72 |
| 4 | 30.0 | 29.0 | 7.14 | 4.64 | 24.48 | 30.4 | 68.0 | 1.2 | 2,004.82 | 5,800 | 3,570 | 0.62 | ND | ND | ND |
| 5 | 31.0 | 30.0 | 7.28 | 3.52 | 28.00 | 31.4 | 66.4 | 1.9 | 1,943.58 | 6,800 | 3,840 | 0.56 | ND | ND | ND |
| 6 | 30.0 | 30.0 | 7.29 | 1.60 | 29.60 | 32.7 | 62.8 | 4.2 | 1,827.23 | 6,980 | 4,140 | 0.59 | 3,811.58 | 2,820.99 | 1,856.27 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.33 | 1.44 | 31.04 | 31.8 | 60.3 | 7.6 | 1,365.90 | 7,500 | 4,260 | 0.57 | ND | ND | ND |
| 8 | 30.0 | 30.0 | 7.25 | 1.52 | 32.56 | 33.2 | 58.4 | 8.0 | 1,298.54 | 7,560 | 4,350 | 0.58 | ND | ND | ND |
| 9 | 29.0 | 29.0 | 7.25 | 1.44 | 34.00 | 35.1 | 56.6 | 8.0 | 1,108.71 | 5,800 | 4,680 | 0.81 | 1,821.23 | 1,007.14 | 911.72 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 7.42 | 0.96 | 34.96 | 37.0 | 52.4 | 10.4 | 1,298.54 | 8,440 | 4,620 | 0.55 | ND | ND | ND |
| 11 | 29.0 | 29.0 | 7.37 | 0.88 | 35.84 | 37.1 | 48.7 | 13.9 | 1,163.82 | 8,500 | 4,680 | 0.55 | ND | ND | ND |
| 12 | 28.0 | 28.0 | 7.49 | 0.80 | 36.64 | 38.3 | 45.5 | 15.9 | 976.03 | 8,440 | 4,410 | 0.52 | 1,717.24 | 1,286.83 | 757.23 |
| 13 | 30.0 | 29.5 | 7.40 | 0.80 | 37.44 | 40.0 | 41.1 | 18.4 | 1,012.77 | 8,560 | 4,350 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 14 | 29.0 | 29.0 | 7.46 | 0.76 | 38.2 | 44.9 | 40.7 | 14.2 | 575.94 | 8,700 | 4,290 | 0.49 | ND | ND | ND |
| 15 | 29.0 | 29.0 | 7.65 | 0.52 | 38.72 | 46.0 | 37.2 | 16.4 | 455.79 | 8,640 | 3,900 | 0.45 | 2,199.34 | 1,137.40 | 253.58 |
| 16 | 29.0 | 29.0 | 7.65 | 0.44 | 39.16 | 50.2 | 35.4 | 15.1 | 289.98 | 8,720 | 3,900 | 0.45 | ND | ND | ND |
| 17 | 29.0 | 29.0 | 7.65 | 0.30 | 39.46 | 52.3 | 32.6 | 14.4 | 385.04 | 8,800 | 3,750 | 0.43 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.57 | 0.23 | 39.69 | 54.4 | 30.7 | 14.4 | 403.00 | 8,000 | 4,050 | 0.51 | 1,655.14 | 991.22 | 0 |
| 19 | 27.0 | 27.0. | 7.66 | 0.15 | 39.84 | 55.9 | 29.3 | 14.5 | 378.92 | 8,400 | 4,050 | 0.48 | ND | ND | ND |
| 20 | 28.0 | 28.0 | 7.76 | 0.00 | 39.84 | 53.0 | 27.6 | 18.9 | 316.14 | 8,840 | 4,290 | 0.49 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 16** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 20 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 7.21 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2,718.58 | 1,420 | 420 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 31.0 | 6.94 | 6.80 | 6.80 | 17.6 | 81.9 | 0.1 | 2,330.74 | 3,200 | 1,950 | 0.61 | ND | ND | ND |
| 2 | 31.0 | 31.0 | 7.56 | 12.47 | 19.27 | 19.7 | 79.7 | 0.2 | 1,687.94 | 5,400 | 2,700 | 0.50 | ND | ND | ND |
| 3 | 30.0 | 30.0 | 7.78 | 6.08 | 25.35 | 22.8 | 76.9 | 0.2 | 1,818.58 | 7,500 | 3,060 | 0.41 | 967.40 | 506.70 | 385.31 |
| 4 | 30.0 | 30.0 | 7.60 | 5.72 | 31.07 | 18.2 | 81.1 | 0.1 | 1,785.92 | 7,400 | 3,600 | 0.49 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 7.66 | 3.69 | 34.76 | 21.8 | 77.7 | 0.1 | 1,365.21 | 7,280 | 3,540 | 0.49 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.82 | 3.02 | 37.78 | 33.0 | 66.5 | 0.2 | 1,650.99 | 4,900 | 5,190 | 1.06 | 1,385.17 | 858.48 | 612.78 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.20 | 0.99 | 38.77 | 39.1 | 55.9 | 4.6 | 1,323.56 | 7,100 | 7,050 | 0.99 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.43 | 0.50 | 39.27 | 44.6 | 50.5 | 4.5 | 1,156.18 | 7,000 | 4,140 | 0.59 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.47 | 1.22 | 40.49 | 47.0 | 44.3 | 8.1 | 1,421.23 | 7,200 | 4,050 | 0.56 | 1,364.18 | 1,056.69 | 900.78 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 7.57 | 1.35 | 41.84 | 50.5 | 38.6 | 10.2 | 1,182.40 | 7,000 | 3,750 | 0.54 | ND | ND | ND |
| 11 | 31.0 | 30.0 | 7.46 | 1.35 | 43.19 | 54.2 | 35.5 | 9.6 | 949.70 | 7,400 | 3,930 | 0.53 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.45 | 1.40 | 44.59 | 56.1 | 31.4 | 12.1 | 912.90 | 7,300 | 3,900 | 0.53 | 1,269.27 | 963.13 | 1,141.66 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.43 | 1.49 | 46.08 | 62.2 | 28.3 | 9.0 | 921.06 | 7,200 | 3,660 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 14 | 30.5 | 30.0 | 7.50 | 1.76 | 47.84 | 64.7 | 26.8 | 8.1 | 870.31 | 6,800 | 3,450 | 0.51 | ND | ND | ND |
| 15 | 31.0 | 31.0 | 7.54 | 1.26 | 49.10 | 66.7 | 25.5 | 7.5 | 810.67 | 6,900 | 3,330 | 0.48 | 1,184.84 | 1,051.58 | 1,055.85 |
| 16 | 31.0 | 30.0 | 7.45 | 1.31 | 50.41 | 67.5 | 24.2 | 7.9 | 707.21 | 7,120 | 3,300 | 0.46 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.76 | 0.32 | 50.73 | 68.2 | 23.9 | 7.5 | 536.56 | 7,200 | 3,210 | 0.45 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.97 | 1.22 | 51.95 | 69.2 | 23.4 | 7.2 | 694.15 | 7,200 | 3,060 | 0.43 | 1,126.48 | 884.02 | 709.86 |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.90 | 0.72 | 52.67 | 69.1 | 22.4 | 8.1 | 626.51 | 7,320 | 3,090 | 0.42 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 16** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 20 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 8.04 | 0.72 | 53.39 | 68.5 | 21.5 | 9.5 | 770.13 | 7,600 | 3,090 | 0.41 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 7.96 | 0.81 | 54.20 | 69.3 | 21.2 | 9.1 | 804.42 | 7,900 | 3,180 | 0.40 | 1,104.04 | 1,004.55 | 721.16 |
| 22 | 30.0 | 29.0 | 7.87 | 0.27 | 54.47 | 70.1 | 21.2 | 8.5 | 827.24 | 7,900 | 3,000 | 0.38 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 7.87 | 0.41 | 54.88 | 70.3 | 21.1 | 8.3 | 599.37 | 8,400 | 3,000 | 0.36 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 8.01 | 0.49 | 55.37 | 69.1 | 20.8 | 9.6 | 517.31 | 8,200 | 2,700 | 0.33 | 967.78 | 1,237.59 | 0.00 |
| 25 | 29.0 | 29.0 | 8.14 | 0.27 | 55.64 | 68.8 | 20.5 | 10.2 | 498.13 | 8,400 | 2,550 | 0.30 | ND | ND | ND |
| 26 | 29.0 | 29.0 | 7.95 | 0.36 | 56.00 | 68.1 | 20.1 | 11.4 | 424.64 | 8,520 | 2,580 | 0.30 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.94 | 0.27 | 56.27 | 68.2 | 19.2 | 12.2 | 448.32 | 8,720 | 2,400 | 0.28 | 905.82 | 884.02 | 0.00 |
| 28 | 29.0 | 29.0 | 8.06 | 0.23 | 56.50 | 68.7 | 18.9 | 12.0 | 378.10 | 8,600 | 2,220 | 0.26 | ND | ND | ND |
| 29 | 29.0 | 29.0 | 7.96 | 0.36 | 56.86 | 70.4 | 18.9 | 10.5 | 409.54 | 8,000 | 2,070 | 0.26 | ND | ND | ND |
| 30 | 29.0 | 29.0 | 8.25 | 0.27 | 57.13 | 69.6 | 18.8 | 11.3 | 454.85 | 8,240 | 2,100 | 0.25 | 420.85 | 933.49 | 0.00 |
| 31 | 30.0 | 29.5 | 7.97 | 0.27 | 57.40 | 69.2 | 18.6 | 11.8 | 444.24 | 7,800 | 1,890 | 0.24 | ND | ND | ND |
| 32 | 29.0 | 29.0 | 8.04 | 0.23 | 57.63 | 70.5 | 18.0 | 11.1 | 398.51 | 8,400 | 1,950 | 0.23 | ND | ND | ND |
| 33 | 29.0 | 29.0 | 8.03 | 0.27 | 57.90 | 71.1 | 18.3 | 10.3 | 381.37 | 8,220 | 1,860 | 0.23 | 269.47 | 947.32 | 0.00 |
| 34 | 30.0 | 29.8 | 7.97 | 0.22 | 58.12 | 72.2 | 17.7 | 10.0 | 319.72 | 7,700 | 1,710 | 0.22 | ND | ND | ND |
| 35 | 29.0 | 29.0 | 8.12 | 0.18 | 58.30 | 72.6 | 17.6 | 9.7 | 300.13 | 7,600 | 1,650 | 0.22 | ND | ND | ND |
| 36 | 29.0 | 29.0 | 7.98 | 0.16 | 58.46 | 72.4 | 17.3 | 10.2 | 278.49 | 7,800 | 1,890 | 0.24 | 74.36 | 397.36 | 317.24 |
| 37 | 30.0 | 29.0 | 7.80 | 0.12 | 58.58 | 72.2 | 17.3 | 10.4 | 253.99 | 7,800 | 1,800 | 0.23 | ND | ND | ND |
| 38 | 30.0 | 30.0 | 8.30 | 0.00 | 58.58 | 71.2 | 17.6 | 11.0 | 247.05 | 7,860 | 1,590 | 0.20 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 17** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 50 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg as $CaCO_3$/L)[c] | VFA (mg as acetate/L)[c] | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | | | | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 8.30 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5,847.37 | 1,400 | 750 | 0.54 | 1,775.29 | 597.08 | 851.63 |
| 1 | 31.0 | 31.0 | 7.32 | 28.49 | 28.49 | 2.9 | 16.2 | 64.9 | 4,083.73 | 3,700 | 1,800 | 0.49 | ND | ND | ND |
| 2 | 31.0 | 31.0 | 6.83 | 54.66 | 83.15 | 1.5 | 12.0 | 69.7 | 2,858.98 | 3,640 | 3,300 | 0.91 | ND | ND | ND |
| 3 | 30.0 | 30.0 | 6.35 | 26.73 | 109.88 | 0.7 | 5.5 | 75.3 | 2,323.56 | 3,300 | 4,200 | 1.27 | 2,128.48 | 840.97 | 1,552.12 |
| 4 | 30.0 | 30.0 | 6.73 | 16.01 | 125.89 | 0.5 | 3.6 | 77.1 | 1,825.49 | 6,600 | 6,900 | 1.05 | ND | ND | ND |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 6.67 | 10.07 | 135.96 | 20.1 | 74.0 | 5.3 | 2,156.18 | 3,880 | 4,350 | 1.12 | ND | ND | ND |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.73 | 15.18 | 151.14 | 19.7 | 74.7 | 4.9 | 3,225.79 | 4,400 | 4,350 | 0.99 | 1,877.35 | 835.24 | 1317.23 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 6.67 | 14.85 | 165.99 | 19.6 | 74.6 | 5.0 | 3,242.12 | 4,800 | 4,500 | 0.94 | ND | ND | ND |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 6.39 | 10.23 | 176.22 | 20.6 | 76.7 | 2.1 | 2,133.41 | 3,500 | 4,350 | 1.24 | ND | ND | ND |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 6.34 | 8.50 | 184.72 | 23.1 | 75.3 | 1.1 | 1,974.20 | 3,600 | 4,800 | 1.33 | 2,011.51 | 1,079.09 | 2,025.94 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 6.42 | 12.00 | 196.72 | 26.3 | 68.5 | 1.2 | 1,721.08 | 3,700 | 4,890 | 1.32 | ND | ND | ND |
| 11 | 31.0 | 30.0 | 6.43 | 14.00 | 210.72 | 33.6 | 64.5 | 1.5 | 1,242.08 | 3,400 | 4,410 | 1.30 | ND | ND | ND |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 6.56 | 13.60 | 224.32 | 41.0 | 55.7 | 2.9 | 1,188.19 | 3,640 | 4,560 | 1.25 | 1,359.97 | 1,125.27 | 1,438.02 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 6.67 | 12.00 | 236.32 | 49.0 | 44.5 | 5.8 | 1,057.14 | 3,700 | 4,200 | 1.14 | ND | ND | ND |
| 14 | 30.5 | 30.0 | 7.23 | 10.20 | 246.52 | 59.2 | 34.2 | 6.0 | 1,172.27 | 3,720 | 3,600 | 0.97 | ND | ND | ND |
| 15 | 31.0 | 31.0 | 7.56 | 9.15 | 255.67 | 66.6 | 25.5 | 7.4 | 903.17 | 4,100 | 3,300 | 0.80 | 1,358.04 | 1,169.90 | 1,399.48 |
| 16 | 31.0 | 30.0 | 7.60 | 8.25 | 263.92 | 72.0 | 18.5 | 8.8 | 574.47 | 4,400 | 3,120 | 0.71 | ND | ND | ND |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.80 | 8.80 | 272.72 | 73.7 | 16.6 | 9.2 | 534.87 | 4,800 | 3,000 | 0.63 | ND | ND | ND |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.71 | 6.00 | 278.72 | 74.4 | 16.7 | 8.5 | 723.07 | 4,740 | 2,730 | 0.58 | 182.66 | 1,106.01 | 1,110.75 |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.63 | 5.60 | 284.32 | 74.9 | 16.8 | 7.8 | 658.57 | 4,820 | 2,550 | 0.53 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)
[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)
[c] Titration method (AOAC International, 2000)
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)
ND, Not determined
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 17** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ CMR 35-22-196 (หรือระยอง 11) ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 17.34% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 50 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 7.68 | 5.20 | 289.52 | 75.7 | 15.9 | 8.0 | 558.14 | 4,800 | 2,490 | 0.52 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 7.87 | 3.60 | 293.12 | 75.9 | 14.5 | 8.9 | 547.93 | 5,000 | 2,400 | 0.48 | 36.98 | 1,219.61 | 1,364.92 |
| 22 | 30.0 | 29.0 | 8.02 | 2.80 | 295.92 | 75.7 | 13.5 | 10.5 | 516.91 | 5,500 | 2,340 | 0.43 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 7.97 | 2.40 | 298.32 | 75.8 | 13.6 | 10.1 | 476.49 | 5,800 | 2,400 | 0.41 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 7.86 | 2.00 | 300.32 | 72.5 | 13.5 | 13.5 | 640.61 | 5,300 | 2,100 | 0.40 | 84.06 | 1,130.50 | 0.00 |
| 25 | 29.0 | 29.0 | 7.87 | 1.60 | 301.92 | 71.2 | 14.2 | 14.5 | 447.10 | 5,200 | 1,950 | 0.38 | ND | ND | ND |
| 26 | 29.0 | 29.0 | 7.88 | 1.20 | 303.12 | 68.6 | 14.2 | 16.7 | 435.66 | 5,400 | 1,950 | 0.36 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.90 | 1.60 | 304.72 | 69.6 | 18.8 | 11.3 | 559.36 | 5,400 | 1,830 | 0.34 | 49.71 | 1,341.61 | 0.00 |
| 28 | 29.0 | 29.0 | 7.78 | 1.40 | 306.12 | 64.9 | 15.4 | 19.4 | 494.86 | 5,600 | 1,860 | 0.33 | ND | ND | ND |
| 29 | 29.0 | 29.0 | 7.96 | 1.20 | 307.32 | 65.3 | 15.6 | 18.7 | 561.81 | 5,700 | 1,860 | 0.33 | ND | ND | ND |
| 30 | 29.0 | 29.0 | 7.90 | 0.80 | 308.12 | 62.8 | 16.2 | 20.1 | 434.44 | 5,800 | 1,770 | 0.31 | 1.63 | 1,129.34 | 0.00 |
| 31 | 30.0 | 29.5 | 7.83 | 0.60 | 308.72 | 66.7 | 17.5 | 15.7 | 487.10 | 5,400 | 1,650 | 0.31 | ND | ND | ND |
| 32 | 29.0 | 29.0 | 7.89 | 1.00 | 309.72 | 66.8 | 17.6 | 15.6 | 446.28 | 5,240 | 1,500 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 33 | 29.0 | 29.0 | 7.73 | 0.60 | 310.32 | 67.1 | 17.5 | 15.4 | 409.13 | 5,080 | 2,010 | 0.40 | 0.00 | 910.71 | 0.00 |
| 34 | 29.0 | 29.0 | 8.04 | 0.80 | 311.12 | 67.1 | 17.6 | 15.3 | 381.37 | 5,300 | 1,380 | 0.26 | ND | ND | ND |
| 35 | 30.0 | 29.0 | 8.10 | 0.60 | 311.72 | 66.7 | 17.7 | 15.5 | 373.20 | 5,540 | 1,530 | 0.28 | ND | ND | ND |
| 36 | 30.0 | 30.0 | 8.18 | 0.40 | 312.12 | 67.0 | 17.7 | 15.2 | 374.02 | 5,500 | 1,470 | 0.27 | 0.00 | 939.96 | 0.00 |
| 37 | 31.0 | 30.0 | 7.86 | 0.60 | 312.72 | 67.2 | 17.5 | 15.1 | 371.16 | 5,360 | 1,440 | 0.27 | ND | ND | ND |
| 38 | 30.0 | 30.0 | 7.94 | 0.30 | 313.02 | 67.3 | 18.1 | 14.5 | 300.13 | 5,240 | 1,560 | 0.30 | ND | ND | ND |
| 39 | 30.0 | 30.0 | 8.14 | 0.00 | 313.02 | 64.9 | 18.5 | 16.1 | 339.73 | 5,100 | 1,500 | 0.29 | 0.00 | 748.38 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 18** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 14.18% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 50 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)[c] | VFA (mg/L as acetate)[c] | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | $H_2S$ (ppm) | | | | Acetate | Formate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 28.0 | 27.0 | 7.22 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5,290.98 | 575 | 323 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1 | 29.0 | 28.0 | 6.44 | 21.56 | 21.56 | 20.5 | 63.3 | 15.1 | 509 | 3,366.21 | 2,385 | 1,095 | 589.17 | 610.97 | 115.89 | 90.09 |
| 2 | 29.5 | 29.0 | 6.60 | 46.86 | 68.42 | 20.9 | 76.8 | 2.1 | 452 | 2,546.05 | 3,750 | 2,205 | 564.07 | 686.83 | 193.03 | 419.06 |
| 3 | 26.0 | 25.0 | 6.99 | 21.62 | 90.04 | 20.8 | 77.2 | 1.8 | 765 | 2,433.79 | 4,025 | 2,723 | 1,316.79 | 538.01 | 811.39 | 912.78 |
| 4 | 23.5 | 23.0 | 7.01 | 11.06 | 101.10 | 25.0 | 69.5 | 4.0 | 544 | 1,950.01 | 5,185 | 3,510 | 1,916.91 | 393.94 | 732.24 | 1,516.80 |
| 5 | 26.0 | 25.0 | 6.95 | 13.22 | 114.32 | 29.0 | 67.0 | 3.7 | 426 | 1,690.77 | 5,690 | 3,675 | 1,986.99 | 453.25 | 803.80 | 1,639.86 |
| 6 | 28.0 | 27.0 | 7.08 | 11.37 | 125.69 | 34.0 | 62.7 | 3.1 | 561 | 950.51 | 5,620 | 4,185 | 1,789.37 | 459.38 | 866.04 | 1,639.47 |
| 7 | 28.0 | 27.5 | 7.47 | 10.82 | 136.51 | 41.9 | 55.0 | 2.9 | 541 | 769.86 | 6,390 | 3,788 | 1,883.37 | 408.81 | 902.88 | 1,639.03 |
| 8 | 28.0 | 28.0 | 7.14 | 12.31 | 148.82 | 49.0 | 47.2 | 3.5 | 534 | 720.87 | 2,285 | 983 | 1,750.56 | 413.42 | 848.08 | 1,454.22 |
| 9 | 30.0 | 29.0 | 7.53 | 12.36 | 161.18 | 56.5 | 39.4 | 3.9 | 673 | 710.66 | 2,275 | 705 | 1,515.24 | 407.58 | 989.55 | 1,046.10 |
| 10 | 28.5 | 28.0 | 7.52 | 13.09 | 174.27 | 63.0 | 32.9 | 3.9 | 444 | 551.67 | 1,940 | 810 | 1,382.06 | 401.95 | 887.70 | 1,380.93 |
| 11 | 28.0 | 28.0 | 7.67 | 12.84 | 187.11 | 67.4 | 28.4 | 4.0 | 446 | 537.79 | 1,965 | 855 | 1,412.37 | 406.28 | 856.41 | 1,050.38 |
| 12 | 27.0 | 27.0 | 7.68 | 13.16 | 200.27 | 69.4 | 25.7 | 4.6 | 430 | 482.67 | 6,310 | 2,768 | 1,494.39 | 391.81 | 685.28 | 505.95 |
| 13 | 27.0 | 27.0 | 7.29 | 11.95 | 212.22 | 71.1 | 24.4 | 4.2 | 377 | 530.03 | 1,910 | 878 | 1,913.23 | 397.86 | 849.21 | 318.70 |
| 14 | 28.0 | 27.5 | 7.67 | 11.10 | 223.32 | 71.8 | 23.6 | 4.4 | 304 | 493.29 | 2,050 | 713 | 1,977.65 | 405.79 | 713.04 | 0.00 |
| 15 | 29.0 | 28.0 | 7.79 | 10.77 | 234.09 | 71.5 | 21.8 | 6.2 | 332 | 487.98 | 6,285 | 2,558 | 2,342.35 | 421.02 | 799.07 | 0.00 |
| 16 | 29.0 | 30.0 | 7.47 | 9.29 | 243.38 | 73.1 | 21.5 | 5.2 | 337 | 387.96 | 1,925 | 705 | 1,616.66 | 393.08 | 772.01 | 0.00 |
| 17 | 28.5 | 29.0 | 7.68 | 7.87 | 251.25 | 74.3 | 19.8 | 5.9 | 330 | 359.38 | 2,000 | 653 | 1,448.21 | 418.16 | 680.65 | 0.00 |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 8.23 | 6.27 | 257.52 | 73.3 | 18.1 | 8.3 | 140 | 343.46 | 3,150 | 1,013 | 960.77 | 404.56 | 660.18 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 18** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**หัวมันสำปะหลัง**ดิบทั้งเปลือกพันธุ์ระยอง 5 ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 14.18% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 50 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time (Day) | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | | Starch (mg/L)[b] | Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)[c] | VFA (mg/L as acetate)[c] | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | $H_2S$ (ppm) | | | | Acetate | Formate | Propionate | Butyrate |
| 19 | 23.0 | 26.0 | 8.17 | 4.51 | 262.03 | 76.4 | 17.3 | 6.1 | 298 | 287.27 | 2,070 | 443 | 1,068.42 | 397.78 | 628.52 | 0.00 |
| 20 | 23.0 | 23.5 | 7.87 | 2.46 | 264.49 | 75.4 | 15.2 | 9.1 | 40 | 278.28 | 2,240 | 563 | 1,003.83 | 391.86 | 607.22 | 0.00 |
| 21 | 27.0 | 26.8 | 7.48 | 2.15 | 266.64 | 75.2 | 13.9 | 14.9 | 49 | 353.20 | 3,065 | 983 | 654.88 | 408.85 | 482.50 | 0.00 |
| 22 | 27.0 | 25.8 | 8.05 | 4.81 | 271.45 | 73.9 | 14.2 | 11.8 | 115 | 243.17 | 3,360 | 683 | 775.98 | 391.08 | 331.64 | 0.00 |
| 23 | 27.5 | 27.0 | 7.87 | 3.31 | 274.76 | 74.9 | 14.1 | 10.7 | 187 | 239.50 | 2,315 | 518 | 586.87 | 408.15 | 383.28 | 0.00 |
| 24 | 28.0 | 27.0 | 8.27 | 3.70 | 278.46 | 74.6 | 14.1 | 11.0 | 167 | 413.21 | 6,715 | 1,485 | 460.01 | 416.77 | 223.31 | 0.00 |
| 25 | 27.5 | 27.0 | 8.11 | 4.10 | 282.56 | 75.8 | 14.0 | 10.0 | 222 | 457.71 | 6,975 | 1028 | 456.75 | 391.16 | 334.66 | 0.00 |
| 26 | 28.0 | 28.0 | 8.05 | 3.41 | 285.97 | 75.4 | 14.0 | 10.4 | 220 | 460.36 | 6,920 | 953 | 330.67 | 395.65 | 244.10 | 0.00 |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.95 | 3.41 | 289.38 | 74.3 | 13.9 | 11.5 | 192 | 465.26 | 7,350 | 1793 | 257.25 | 421.06 | 118.26 | 0.00 |
| 28 | 28.5 | 28.5 | 7.95 | 2.90 | 292.28 | 74.8 | 13.9 | 11.1 | 240 | 463.43 | 7,245 | 735 | 211.67 | 412.44 | 103.73 | 0.00 |
| 29 | 29.5 | 28.5 | 8.34 | 3.30 | 295.58 | 73.7 | 13.8 | 12.2 | 220 | 445.87 | 7,970 | 863 | 89.66 | 397.41 | 89.65 | 0.00 |
| 30 | 30.5 | 30.0 | 7.98 | 2.57 | 298.15 | 74.6 | 14.0 | 11.2 | 128 | 403.82 | 7,540 | 1890 | 78.90 | 457.21 | 27.87 | 0.00 |
| 31 | 31.0 | 30.0 | 8.25 | 2.57 | 300.72 | 74.3 | 14.0 | 11.4 | 157 | 258.69 | 7,950 | 825 | 41.08 | 510.6 | 0.00 | 0.00 |
| 32 | 30.0 | 30.0 | 8.10 | 1.62 | 302.34 | 73.9 | 14.4 | 11.5 | 167 | 288.29 | 8,085 | 840 | 0.00 | 419.67 | 0.00 | 0.00 |
| 33 | 31.0 | 31.0 | 8.03 | 1.32 | 303.66 | 72.9 | 14.6 | 12.4 | 168 | 356.67 | 7,845 | 900 | 0.00 | 403.87 | 0.00 | 0.00 |
| 34 | 31.0 | 31.0 | 7.86 | 0.34 | 304.00 | 71.5 | 15.0 | 13.4 | 181 | 286.45 | 7,670 | 810 | 0.00 | 412.28 | 0.00 | 0.00 |
| 35 | 32.0 | 31.8 | 8.07 | 0.00 | 304.00 | 69.9 | 15.1 | 14.8 | 171 | 210.92 | 7,410 | 683 | 0.00 | 398.47 | 0.00 | 0.00 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 19** การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลังที่มี** Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 50 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 0 | 31.0 | 31.0 | 7.19 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2,820.43 | 1,400 | 750 | 0.54 | 60.83 | 244.72 | 0.00 |
| 1 | 31.0 | 31.0 | 6.87 | 17.33 | 17.33 | 18.6 | 80.8 | 0.2 | 1,993.49 | 3,000 | 1,650 | 0.55 | ND | ND | 400.00 |
| 2 | 31.0 | 31.0 | 7.41 | 31.24 | 48.57 | 19.1 | 80.4 | 0.1 | 2,622.20 | 5,100 | 2,400 | 0.47 | ND | ND | 950.00 |
| 3 | 30.0 | 30.0 | 7.52 | 13.53 | 62.10 | 22.3 | 77.2 | 0.1 | 3,993.92 | 7,000 | 2,700 | 0.39 | 644.48 | 378.07 | 0.00 |
| 4 | 30.0 | 30.0 | 7.41 | 14.96 | 77.06 | 18.8 | 80.7 | 0.1 | 2,148.63 | 7,100 | 3,390 | 0.48 | ND | ND | 1,290.00 |
| 5 | 29.0 | 29.0 | 7.49 | 7.81 | 84.87 | 19.6 | 79.8 | 0.1 | 3,629.96 | 7,300 | 3,300 | 0.45 | ND | ND | 1,450.00 |
| 6 | 29.0 | 29.0 | 6.62 | 6.22 | 91.08 | 28.8 | 70.6 | 0.2 | 2,311.31 | 4,900 | 4,800 | 0.98 | 1,098.35 | 696.19 | 0.00 |
| 7 | 30.0 | 29.0 | 7.25 | 7.04 | 98.12 | 34.6 | 64.8 | 0.4 | 1,845.91 | 7,000 | 3,600 | 0.51 | ND | ND | 1,100.26 |
| 8 | 29.0 | 29.0 | 7.31 | 5.39 | 103.51 | 40.4 | 57.4 | 1.9 | 1,805.08 | 6,700 | 3,900 | 0.58 | ND | ND | 750.29 |
| 9 | 30.0 | 30.0 | 7.38 | 4.13 | 107.64 | 44.7 | 51.3 | 3.6 | 1,772.11 | 6,800 | 3,750 | 0.55 | 1,321.80 | 930.59 | 0.00 |
| 10 | 30.0 | 30.0 | 7.43 | 2.58 | 110.22 | 47.7 | 45.7 | 6.1 | 1,814.98 | 6,620 | 3,750 | 0.57 | ND | ND | 810.28 |
| 11 | 31.0 | 30.0 | 7.35 | 2.15 | 112.37 | 50.4 | 42.6 | 6.7 | 1,286.30 | 6,520 | 3,840 | 0.59 | ND | ND | 700.29 |
| 12 | 29.0 | 29.0 | 7.23 | 1.98 | 114.35 | 53.4 | 38.5 | 7.8 | 1,084.21 | 6,500 | 3,900 | 0.60 | 1,520.88 | 973.59 | 0.00 |
| 13 | 29.0 | 29.0 | 7.30 | 2.75 | 117.10 | 58.3 | 33.6 | 7.6 | 990.31 | 6,600 | 3,900 | 0.59 | ND | ND | 700.30 |
| 14 | 30.5 | 30.0 | 7.32 | 2.59 | 119.68 | 61.0 | 31.7 | 6.9 | 712.70 | 6,600 | 3,540 | 0.54 | ND | ND | 940.27 |
| 15 | 31.0 | 31.0 | 7.40 | 2.69 | 122.38 | 61.5 | 29.6 | 8.4 | 1,755.25 | 6,600 | 3,510 | 0.53 | 2,975.48 | 2,713.39 | 1665.52 |
| 16 | 31.0 | 30.0 | 7.35 | 2.33 | 124.71 | 63.3 | 28.5 | 7.9 | 1,419.67 | 6,700 | 3,540 | 0.53 | ND | ND | 990.26 |
| 17 | 30.0 | 30.0 | 7.48 | 2.15 | 126.85 | 64.0 | 28.3 | 7.2 | 1,735.66 | 6,800 | 3,300 | 0.49 | ND | ND | 1200.24 |
| 18 | 29.0 | 29.0 | 7.79 | 2.02 | 128.87 | 64.0 | 27.1 | 8.4 | 1,496.83 | 7,400 | 3,540 | 0.48 | 1,613.55 | 1,066.15 | 0.00 |
| 19 | 29.0 | 29.0 | 7.68 | 1.80 | 130.67 | 65.7 | 25.5 | 8.3 | 1,488.26 | 6,840 | 3,000 | 0.44 | ND | ND | 1,420.22 |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

**ตารางผนวกที่ 19** (ต่อ) การผลิตมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพจาก**กากมันสำปะหลัง**ที่มี Total solids 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งที่มีความชื้น 15.19% เติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน Single-stage digester ที่มี**ปริมาตรหมัก 50 ลิตร** ใช้ Seed culture ชุดที่ 1 (ถังที่ 1 รูปที่ 3.5ค)

| Time | Temperature (°C) | | pH | Biogas yield (L) | | Biogas composition (%)[a] | | | Starch | Alkalinity | VFA | VFA/A | Volatile fatty acids (ppm)[d] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Day) | Room | Slurry | | per day | accumulated | $CH_4$ | $CO_2$ | $N_2$ | (mg/L)[b] | (mg as $CaCO_3$/L)[c] | (mg as acetate/L)[c] | | Acetate | Propionate | Butyrate |
| 20 | 29.0 | 29.0 | 7.87 | 1.80 | 132.47 | 66.0 | 24.5 | 9.1 | 1,420.89 | 7,400 | 3,150 | 0.43 | ND | ND | ND |
| 21 | 29.0 | 29.0 | 7.82 | 1.60 | 134.07 | 66.6 | 23.6 | 9.3 | 1,217.52 | 7,100 | 2,850 | 0.40 | 1,111.33 | 1,708.04 | 0.00 |
| 22 | 30.0 | 29.0 | 7.82 | 1.60 | 135.67 | 68.3 | 23.0 | 8.6 | 970.94 | 7,760 | 3,090 | 0.40 | ND | ND | ND |
| 23 | 29.0 | 29.0 | 7.75 | 1.40 | 137.07 | 66.4 | 22.5 | 10.6 | 858.26 | 7,900 | 2,940 | 0.37 | ND | ND | ND |
| 24 | 30.0 | 30.0 | 7.94 | 1.40 | 138.47 | 67.5 | 22.0 | 10.1 | 1,091.78 | 7,160 | 2,490 | 0.35 | 1,377.78 | 3,019.00 | 0.00 |
| 25 | 29.0 | 29.0 | 8.01 | 1.30 | 139.77 | 67.1 | 21.8 | 10.4 | 1,026.46 | 8,200 | 2,880 | 0.35 | ND | ND | ND |
| 26 | 29.0 | 29.0 | 8.09 | 1.20 | 140.97 | 68.8 | 21.6 | 9.2 | 1,084.44 | 8,440 | 2,700 | 0.32 | ND | ND | ND |
| 27 | 29.0 | 29.0 | 7.78 | 1.05 | 142.02 | 68.4 | 21.1 | 10.0 | 921.14 | 8,400 | 2,550 | 0.30 | 1,111.33 | 1,708.04 | 0.00 |
| 28 | 29.0 | 29.0 | 7.89 | 1.10 | 143.12 | 69.8 | 20.9 | 8.9 | 978.29 | 8,600 | 2,550 | 0.30 | ND | ND | ND |
| 29 | 29.0 | 29.0 | 8.05 | 1.00 | 144.12 | 70.0 | 20.6 | 8.9 | 449.95 | 8,500 | 2,490 | 0.29 | ND | ND | ND |
| 30 | 29.0 | 29.0 | 8.08 | 0.90 | 145.02 | 69.2 | 20.5 | 9.7 | 460.16 | 7,920 | 2,250 | 0.28 | 1,024.38 | 972.39 | 0.00 |
| 31 | 30.0 | 29.5 | 8.01 | 0.80 | 145.82 | 69.0 | 19.6 | 10.1 | 486.70 | 8,560 | 2,400 | 0.28 | ND | ND | ND |
| 32 | 29.0 | 29.0 | 7.94 | 0.50 | 146.32 | 72.0 | 19.7 | 8.2 | 400.55 | 8,800 | 2,400 | 0.27 | ND | ND | ND |
| 33 | 29.0 | 29.0 | 7.90 | 0.55 | 146.87 | 72.6 | 20.1 | 6.7 | 469.96 | 8,600 | 2,250 | 0.26 | 990.45 | 1,422.47 | 0.00 |
| 34 | 30.0 | 29.8 | 7.97 | 0.49 | 147.37 | 72.8 | 19.1 | 7.2 | 407.50 | 7,900 | 2,040 | 0.26 | ND | ND | ND |
| 35 | 29.0 | 29.0 | 8.05 | 0.28 | 147.64 | 73.0 | 18.9 | 7.5 | 396.88 | 7,840 | 1,740 | 0.22 | ND | ND | ND |
| 36 | 29.0 | 29.0 | 8.00 | 0.33 | 147.97 | 74.4 | 18.6 | 6.9 | 380.14 | 8,000 | 1,770 | 0.22 | 809.60 | 1,108.88 | 0.00 |
| 37 | 30.0 | 29.0 | 7.98 | 0.14 | 148.11 | 74.3 | 18.6 | 7.0 | 307.88 | 8,000 | 1,710 | 0.21 | ND | ND | ND |
| 38 | 30.0 | 30.0 | 8.32 | 0.12 | 148.23 | 76.4 | 16.6 | 6.8 | 229.91 | 8,100 | 1,740 | 0.21 | ND | ND | ND |

[a] Gas Analyser (Geotech Biogas Check Analyzer, Geotechnical Instruments Ltd., England)

[b] Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) method (Dubois *et al*., 1956)

[c] Titration method (AOAC International, 2000)

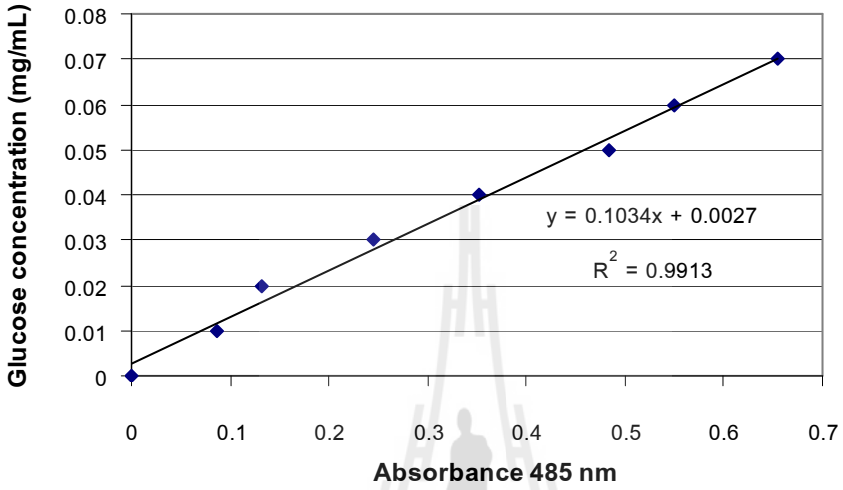
[d] HPLC method (Neves *et al*., 2006)

ND, Not determined

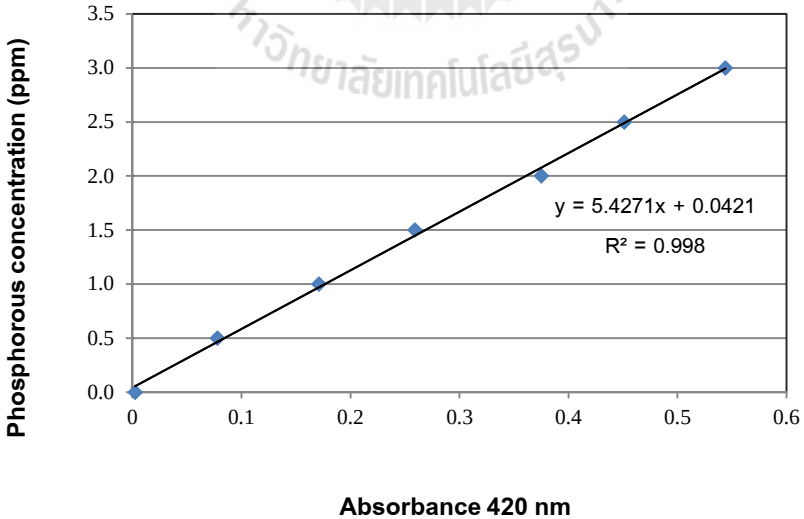
A, Alkalinity; VFA, Volatile fatty acids

## ภาคผนวก ข รูปผนวกกราฟและ Chromatograms

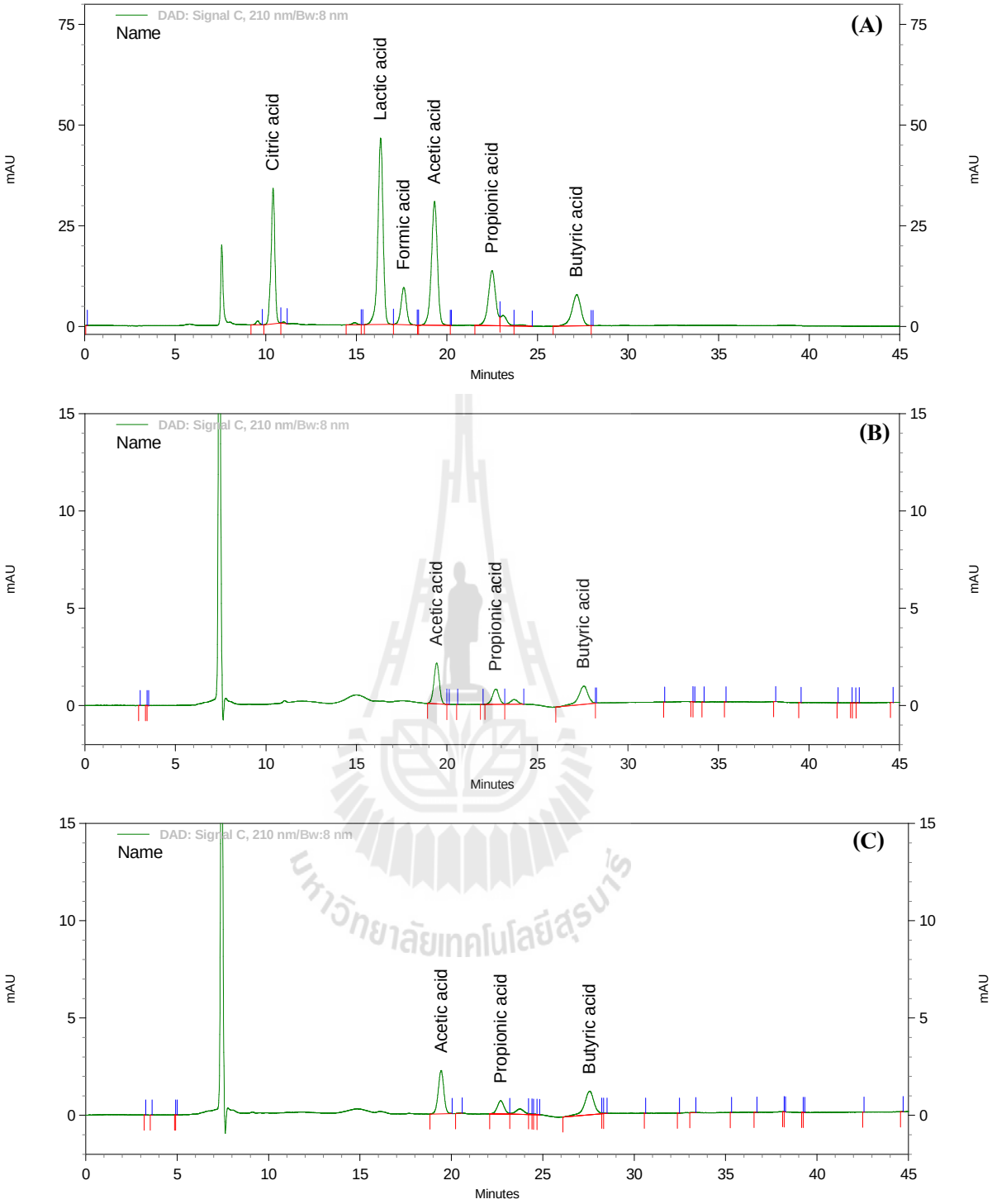
กราฟมาตรฐาน (Standard curve) และ Chromatograms ของการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ (หัวมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง) และวัสดุหมักให้ได้มีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพ



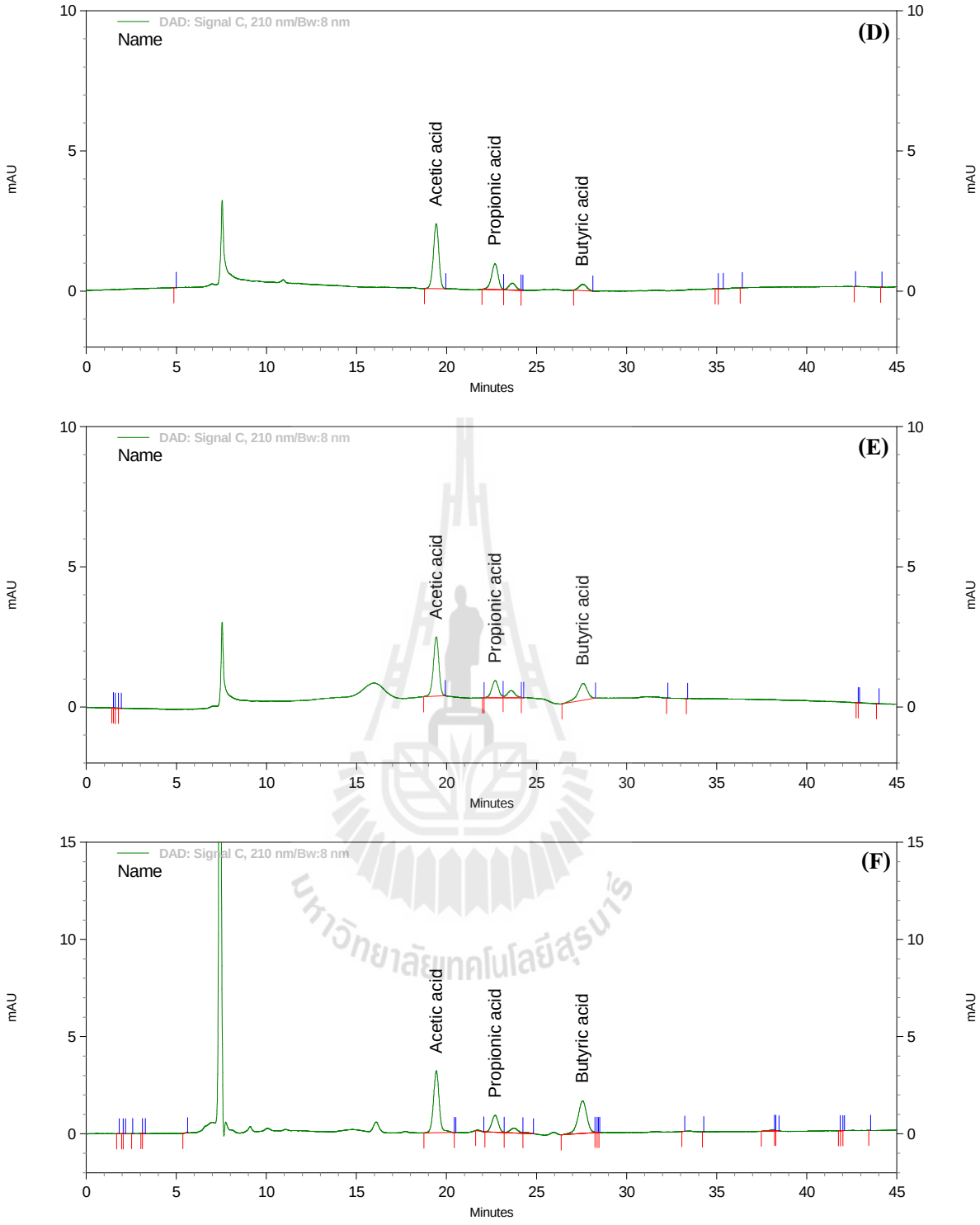

**รูปผนวกที่ 1** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในรูปกลูโคส (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร



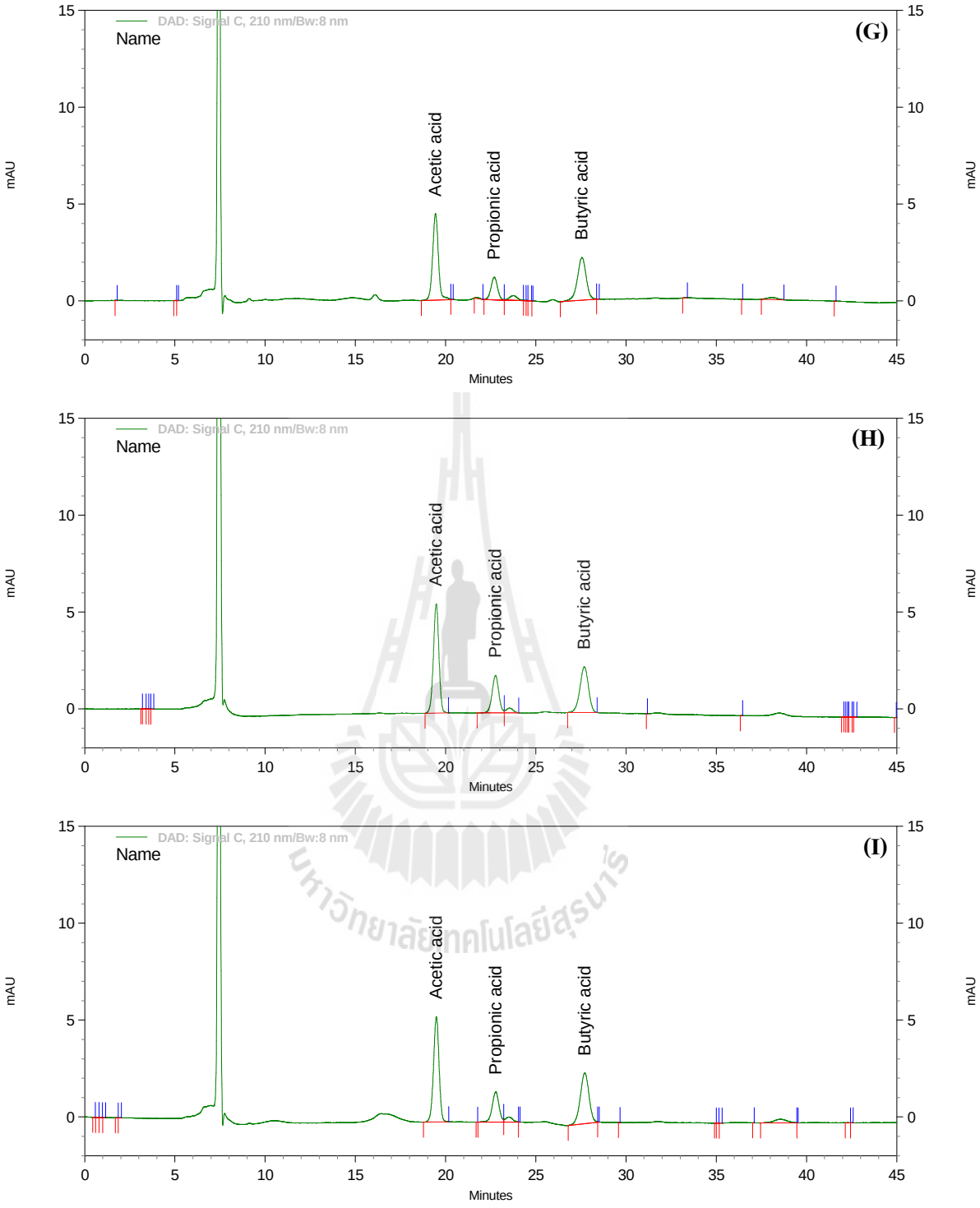

**รูปผนวกที่ 2** กราฟมาตรฐานของฟอสฟอรัส (Standard curve of phosphorus)




**รูปผนวกที่ 3** HPLC chromatograms ของสารละลายมาตรฐาน Citric, Lactic, Formic, Acetic, Propionic และ Butyric acids (Sigma) เข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (A); Acetic, Propionic และ Butyric acids ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำหมักก๊าซชีวภาพที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร (B และ C), 10 ลิตร (D และ E), 20 ลิตร (F และ G) และ 50 ลิตร (H และ I) เจือจาง 100 เท่า




**รูปผนวกที่ 3** (ต่อ) HPLC chromatograms ของสารละลายมาตรฐาน Citric, Lactic, Formic, Acetic, Propionic และ Butyric acids (Sigma) เข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (A); Acetic, Propionic และ Butyric acids ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำหมักก๊าซชีวภาพที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร (B และ C), 10 ลิตร (D และ E), 20 ลิตร (F และ G) และ 50 ลิตร (H และ I) เจือจาง 100 เท่า




**รูปผนวกที่ 3** (ต่อ) HPLC chromatogram ของสารละลายมาตรฐาน Citric, Lactic, Formic, Acetic, Propionic และ Butyric acids (Sigma) เข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (A), Acetic, Propionic และ Butyric acids ในตัวอย่างน้ำหมักก๊าซชีวภาพที่มีปริมาตรหมัก 5 ลิตร (B และ C), 10 ลิตร (D และ E), 20 ลิตร (F และ G) และ 50 ลิตร (H และ I) เจือจาง 100 เท่า

# ประวัติผู้วิจัย

**ชื่อ-สกุล** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีลักษณ์ รอดทอง

**หน่วยงานที่สังกัดและที่อยู่**

สาขาวิชาจุลชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 044-22 4297 โทรสาร 044-22 4185 e-mail: sureelak@sut.ac.th

**ประวัติการศึกษาและฝึกอบรม**

| | | |
|---|---|---|
| วท.บ. (ชีววิทยา เลือกจุลชีววิทยา) | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ประเทศไทย |
| วท.ม. (จุลชีววิทยา) | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ประเทศไทย |
| PGDip.Sci. (Biotechnology) with Credit | University of Otago | นิวซีแลนด์ |
| Ph.D. (Microbiology) | University of Otago | นิวซีแลนด์ |
| Post-Doc (Molecular Biology) | University of Guelph | แคนาดา |
| Certificate (International Training Programme in Biotechnology, ITP 12) | Gesellschaft fÜr Biotechnologische Forschung mbH (GBF) | เยอรมนี |
| Certificate (Proficiency in English) | Victoria University of Wellington | นิวซีแลนด์ |
| Certificate (Laboratory Safety Course) | The Laboratory Safety Institute (LSI) | สหรัฐอเมริกา |
| Certificate (Quality Management of Culture Collection for Curators) | National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC) | ประเทศไทย |
| Certificate (Culture Collection Techniques) | Bangkok MIRCEN | ประเทศไทย |
| วุฒิบัตร (หลักสูตรการออกแบบและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ) | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ปัจจุบันคือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี | ประเทศไทย |

**สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ**

พันธุศาสตร์และสรีรวิทยาของจุลินทรีย์ การหมักของจุลินทรีย์ (แบคทีเรียและเชื้อรา) และความหลากหลายของชนิดและการใช้ประโยชน์ของแบคทีเรียกรดแล็กติกและเชื้อรา

**ผลงานทางวิชาการ**

1. ตำรา หนังสือ/เอกสารประกอบการสอน จำนวน 13 เรื่อง (เล่ม)
2. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ
   วารสารระดับชาติ จำนวน 18 เรื่อง และวารสารระดับนานาชาติ จำนวน 40 เรื่อง
3. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ใน Proceedings จำนวน 26 เรื่อง
4. ผลงานที่เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับชาติ จำนวน 87 เรื่อง
5. ผลงานที่เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 94 เรื่อง
6. สิทธิบัตรที่ยื่นคำขอจดทะเบียน จำนวน 6 คำขอ

# เอกสารแนบ

**ผลงานวิจัยของโครงการที่ได้เผยแพร่:**

Anunputtikul, W. and Rodtong, S. 2007. Laboratory scale experiments for biogas production from cassava tubers. *Asian Journal on Energy and Environment*. 08(01): 444-453.

*As. J. Energy Env.* **2007**, 08(01), 444-453

*Asian Journal on Energy and Environment*

**ISSN 1513-4121**

Available online at www.asian-energy-journal.info

## Laboratory Scale Experiments for Biogas Production from Cassava Tubers

**Wantanee Anunputtikul[1], Sureelak Rodtong[2],***

[1]School of Biology, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

[2]School of Microbiology, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

*Author to whom correspondence should be addressed, email: sureelak@ccs.sut.ac.th

**Abstract:** The production of biogas, an alternative source of energy, from starch-rich tubers of cassava plant, was investigated in the laboratory scale using the simple single-state digesters of 5- and 20-liter working volumes. The digesters were fed on a batch basis with the slurry of dry cassava tuber containing the average moisture content of 18%, and operated at ambient temperature (29-31°C) for 30 days. When operating the single-state digester of 5-liter working volume fed with the optimal concentrations of carbon and nitrogen sources, 1.00% (w/v) total solids and 0.04% (w/v) urea, the gas yield of 1.95 liters/day containing the maximum methane content of 67.92% was achieved at 10-day retention time. The fermentation reactions were ceased after 16-day operation. The fermentation volume was then scaled up to 20 liters. The gas yield of 5.50 liters/day containing 55.70% methane was obtained at 10-day retention time. Whereas the methane content of 67.57% and the gas yield of 3.88 liters/day were obtained at 14-day retention time. The fermentation reactions were ceased after 24-day operation. Biogas containing 67% methane content could be achieved from the digestion of cassava tubers using simple single-state digesters.

**Keywords:** Biogas, Cassava, Cassava Tuber, Methane, Single-state Digester.

## Introduction

Biogas, the gas generated from organic digestion under anaerobic conditions by mixed population of microorganisms, is an alternative energy source which has been commenced to be utilized both in rural and industrial areas at least since 1958 [17]. The gas generally composes of methane (55-65%), carbon dioxide (35-45%), nitrogen (0-3%), hydrogen (0-1%), and hydrogen sulfide (0-1%) [11]. The composition of biogas depends on feed materials. Organic waste has been mainly used for the biogas production, and several kinds of waste materials have been reported to be exploited (4, 6, 7, 9, 10, 20). Raw cassava tubers, the cheap and abundant agriculture product in Thailand [12, 13, 14], are initially investigated to be applied as a raw material for the bio-energy production in our previous [2] and this studies. In this study, the maximum production of biogas and methane from the starch-rich tuber is determined in laboratory scale using the simple single-state digesters

## Materials and methods

### *Preparation of the raw material for biogas production*

Fresh cassava tubers were collected from their plantation area in Nakhon Ratchasima Province, Thailand. To obtain the consistency of the raw material for biogas production experiments, dry cassava tubers containing the average moisture content of 18% were prepared by chopping the whole tuber into pieces, dried under sun light over a two-day period, then crushed into small pieces (<0.2 $cm^3$) using blender (Waring Commercial, U.S.A.). Total solids (TS), volatile solids (VS), ash, and phosphorus contents of the raw material were determined using standard methods [1, 3]. Total carbon and nitrogen contents were also determined using CNS-2000 Elemental Analyzer (Leco Corporation, U.S.A). Starch
concentration was basically detected by spectrophotometry at 580 nm absorbance in the soluble form and presence of iodine [8, 14].

### *Preparation of seed cultures*

Seed cultures were prepared by mixing animal manure and liquid waste collected from the anaerobic pond of the cassava starch production factory in Nakhon Ratchasima Province, then kept in a closed container at room temperature with regular adding a small amount of cassava starch for 3 months before inoculating the biogas production digester.

### *Biogas production from cassava tubers*

The production of biogas from raw cassava tuber was performed using the simple single-state digesters with working volumes of 5 and 20 liters (L) (Table 1, Fig. 1). The digesters were fed on a batch basis with the slurry of dry cassava tuber containing the average moisture content of 18% and 10% (v/v) of seed cultures. The biogas fermentation was then operated in triplicate at ambient temperature for 30 days.

**Table 1** Physical Characteristics of 5-L and 20-L working volume digesters

| Parameter | 5 L | 20 L |
|---|---|---|
| Digester height (cm) | 25.00 | 35.00 |
| Liquid height (cm) | 13.50 | 31.30 |
| Empty volume (L) | 7.50 | 26.00 |
| Filled volume (L) | 5.00 | 20.00 |

Since the amount of main nutrients (carbon and nitrogen sources) affects the growth of microorganisms and the production of biogas, the optimal concentrations of TS (carbon source) and nitrogen source

added were determined. The high carbon-to-nitrogen ratio (approximately 80:1) of cassava root (dry weight) has been reported [16]. The optimum ratios for the maximum biogas generation have been suggested to be 20-30:1 [15, 19]. In this study, various TS concentrations: 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00, and 8.00% (w/v), were applied to the 5-L reaction volume to obtain the optimum TS content. Then the addition of urea (46% of nitrogen) as a nitrogen source at 0.00, 0.02, 0.03, 0.04, 0.10, and 0.20% (w/v) was investigated. For stabilizing pH of cassava slurry during the anaerobic digestion, the addition of sodium bicarbonate (0.25%, w/v) was considered whenever the volatile fatty acids-to-alkalinity ratio was greater than 0.8. The volume of biogas produced in the digester was measured by the displacement of water in the gas holder compartment. The pH of water in this holder was adjusted to 2 to avoid carbon dioxide dissolution [1]. Gas production was measured daily. The composition of biogas collected over water, was analyzed using the Gas Analyser (Shimadzu, Class-GC14B, Japan) equipped with a thermal conductivity detector (TCD) and 1-M Porapak Q (80-100 mesh) column. Helium was used as a carrier gas at a flow rate of 25 mL/min. The oven, injector, and detector temperatures were 80, 120, and 120°C respectively

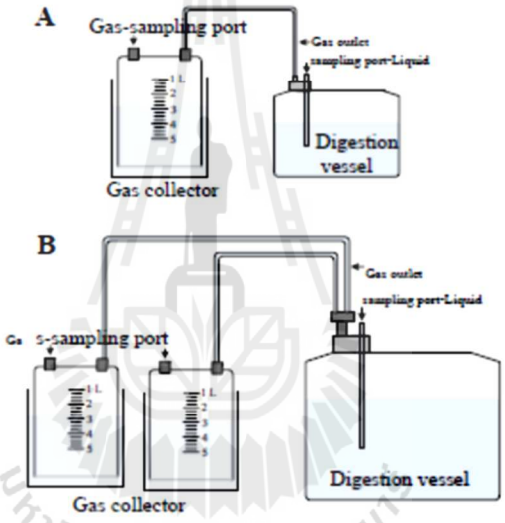



**Fig. 1** Single –state digesters of (A) 5-L and (B) 20-L working Volumes.

Volatile acids (acetic, propionic, and butyric acids) were analyzed using the Gas Analyser (Shimadzu, Class-GC14B, Japan) equipped with a flame ionization detector (FID) and DB-FFAP column. Helium was used as a carrier gas at a flow rate of 40 cm/sec whereas nitrogen was used as a makeup gas at a flow rate of 30 mL/min. The oven, injector, and detector temperatures were 100, 250, and 300°C, respectively. Peak areas were used to calculate concentrations by comparing to calibration curves prepared from standard solutions of acetic, propionic, and butyric acids.

Starch content, alkalinity, and volatile fatty acids (VFA) of cassava slurry during digestion were determined daily. Alkalinity and VFA were determined by the direct titration with sulfuric acid [1]. The VS content and the reduction of VS in the slurry were detected and calculated [20], respectively. The measurement of pH value and temperature was also performed.

The optimal concentrations of both total solids and nitrogen were applied to produce biogas in the scaled-up digester, 20-L working volume.

**Results and Discussion**

***Raw material for biogas production***

Cassava plant variety KU 50 was one of dominant varieties cultivated in Nakhon Ratchasima Province. Fresh starch-rich tubers of the plant were collected. Some physical and chemical compositions of the tuber were analyzed (Table 2). The fresh tuber has approximately 18% of starch, 62% of moisture, 0.9% of ash, and 0.08% of phosphorus. Soccol (1996) stated that fresh cassava roots had 20-30% of starch, 65% of moisture, 0.9% of ash, and 0.03% of phosphorus [16]. The dry starchy material of variety KU 50 containing 18.65% of moisture, 81.35% of TS, 1.95% of ash, 98.05% of VS, 39.56% of total carbon, 38.10% of starch, 0.46% of total nitrogen, and 0.18% of phosphorus, was used to prepare slurry to feed the simple single-state digesters. The average carbon-to-nitrogen ratio of the dry cassava material is 86:1 which is very high ratio compared to the optimum ratios of 20-30:1 for the maximum biogas generation [15, 19].

**Table 2** Compositions of cassava tuber, plant variety KU50, collected from the plantation area in Nakhon Ratchasima Province

| Composition (%) | Fresh weight | Dry weight |
|---|---|---|
| Moisture | 61.66 | 18.65 |
| Total solids (TS) | 38.34 | 81.35 |
| Volatile solids (VS) | 99.12 | 98.05 |
| Total carbon | 18.64 | 39.56 |
| Total nitrogen | 0.22 | 0.46 |
| Starch | 17.96 | 38.10 |
| Ash | 0.88 | 1.95 |
| Phosphorus | 0.08 | 0.18 |

***B iogas production from cassava tubers***

When the single-state digester with working volume of 5 L was used for optimization of some biogas production conditions, the maximum yield of 356.35 L/kg TS fed of biogas was achieved from 1.00% (w/v) TS (Fig. 2). The gas yield of 1.20 liters/day composing the maximum methane content of 64.35% was obtained at 22-day retention time. The fermentation reactions were ceased after operating for 25 days. The volatile solids reduction of fermenting slurry was 39.10%.

The supplement of urea (0.04%, w/v) to the cassava slurry (1.00%, w/v, TS) could stimulate the maximum biogas production. The maximum yield of total biogas was 569.29 L/kg TS fed. The gas yield of 1.95 liters/day containing the maximum methane content of 67.92% was achieved at 10-day retention time (Figs. 3C, 4A and 5). The utilization of volatile solids was 56.83%. But the fermentation reactions were ceased after 16-day operation (Fig. 4A).

When the optimal concentrations of total solids (1.00%, w/v) and urea 0.04% (w/v) were applied to the scaled-up experiment, 20-L reaction volume, the gas yield of 5.50 liters/day containing 55.70% methane was obtained at 10-day retention time. Whereas the methane content of 67.57% and the gas yield of 3.88 liters/day were obtained at 14-day retention time. The fermentation reactions were ceased after 24-day operation (Figs. 4B and 5).

When the digesters was initially fed, acid forming-bacteria quickly produced acid resulting in declining pH below the neutral pH and diminishing growth of methanogenic bacteria and methanogenesis. The pH could be maintained by adding sodium bicarbonate to increase digester alkalinity. In this study,

sodium bicarbonate was added four times during the first week of fermentation for both bioreactor sizes. Afterwards the digesters could maintain themselves (Fig. 4). At the daily methane yield of more than 50% of biogas composition, the digesters operated at a pH range of 7.2 to 7.8 and 7.4 to 8.1 with the alkalinity of 7000-7550 and 6800-9400 mg/L, and VFA of 1585-4218 and 2250-4350 mg/L, for 5-L and 20-L cassava tuber slurry, respectively (Figs. 5 and 6).

Volatile acids (acetic, propionic, and butyric acids) accumulation during cassava tuber fermentation were detected (Fig. 7). The concentration of propionic and butyric acids were higher than that of acetic acid in both digester sizes. Temperatures of the cassava slurry during fermentation were found to be between 29 and 31°C for all experiments

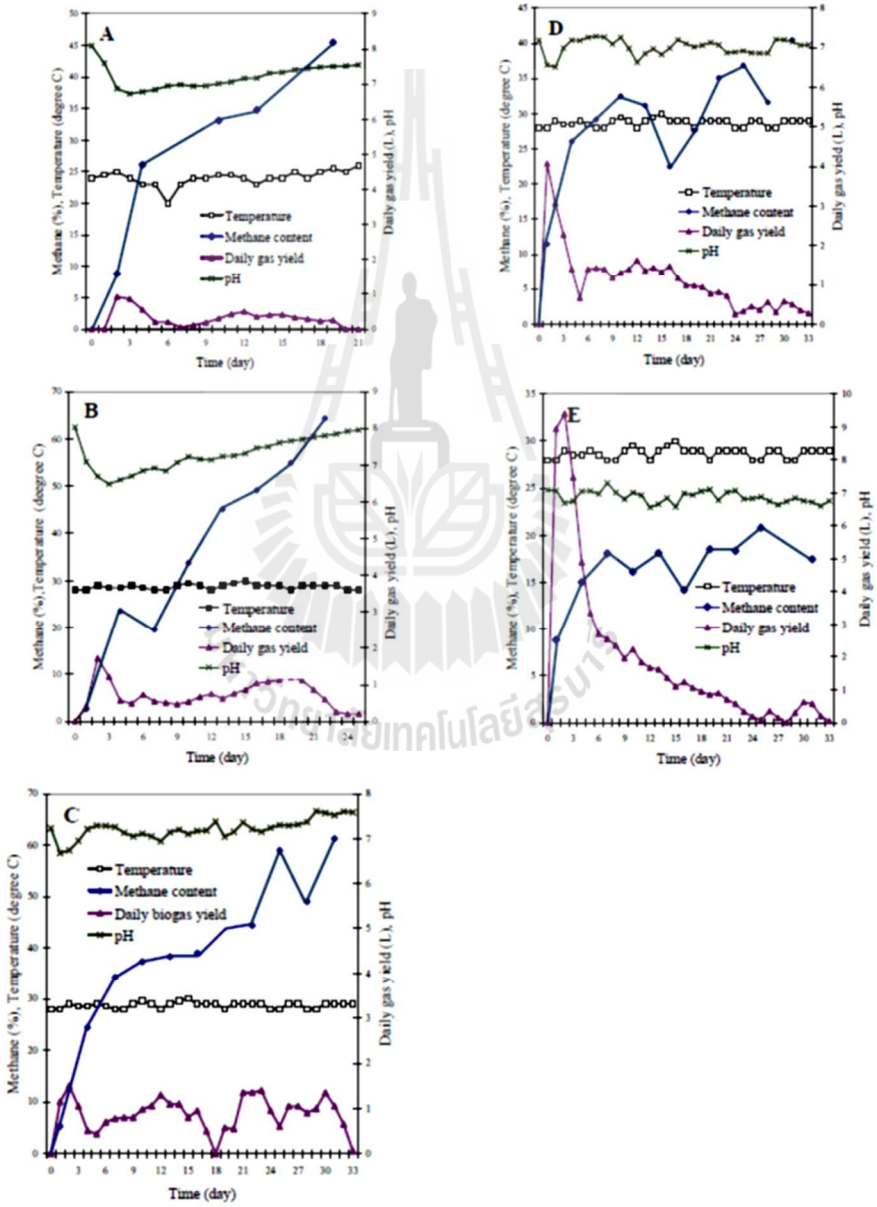



**Fig. 2** Biogas production from cassava tubers using (A) 0.50, (B) 1.00, (C) 2.00, (D) 4.00, and (E) 8.00% (w/v) total solids without supplementing a nitrogen source in the single-state digester of 5-L digestion volume.

(Fig. 4) Total biogas yield, total methane yield, and VS reduction obtained from the two bioreactor sizes were compared (Table 3). The total biogas yields of 5-L and 20-L cassava slurry were 569.29 and 611.32 L/kg TS fed respectively. The biogas yield from 20-L working volume was 6.88% higher than the yield from 5 L. The total methane yield was also higher (339.53 L/kg TS fed from 20 L and 263.90 L/kg TS fed from 5 L). But the average methane contents for overall reactions of 5-L and 20-L digestion mixtures were 46.22% and 55.54%, respectively.

The theoretical biogas yield from carbohydrate has been reported to be 886 L/kg VS fed [5]. From our experiments, the total biogas yields per kg VS fed were 474.67 L and 509.71 L from 5-L and 20-L digestion volumes, respectively (Table 3). The obtainable products were lower than theoretical yields.

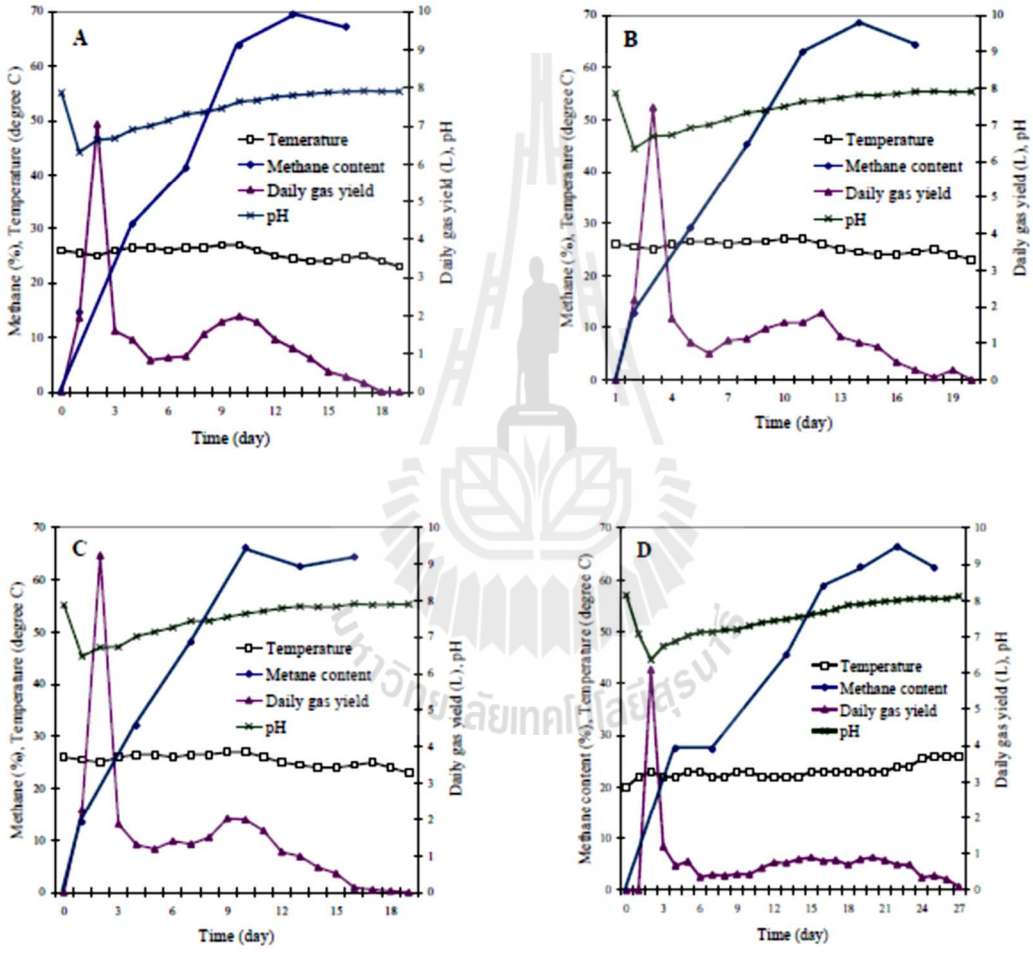



**Fig. 3** Biogas production from cassava tubers using 1.00% (w/v) total solids and urea supplements at various concentrations: (A) 0.02, (B) 0.03, (C) 0.04, and (D) 0.10% (w/v), in the single-state digester of 5-L reaction volume.

**Table 3** Biogas production from cassava tubers in laboratory Scale experiments

| Parameter | Reaction volume (L) | |
|---|---|---|
| | 5 | 20 |
| Total biogas yield (L/kg TS fed) | 569.29 | 611.32 |
| Total biogas yield (L/kg VS fed) | 474.67 | 509.71 |
| Total methane yield (L/kg TS fed) | 263.90 | 339.53 |
| Volatile solids (VS) reduction (%) | 56.83 | 61.51 |

## Conclusions

Biogas containing the methane content of 67% could be efficiently produced from cassava tuber slurry (1%, w/v, TS) and the supplement of urea (0.04%, w/v) in the simple single-state digester with both 5-L and 20-L reaction volumes. Cassava tubers used to prepared the slurry contain the average contents of 81% of TS, 40% of total carbon, 38% of starch, and 0.5% of total nitrogen. One kilogram (kg) TS of the dry tuber was obtained from 1.23 kg of the total dry mass prepared from the whole tuber. And one kg of the dry cassava mass was achieved from 2.11 kg of fresh cassava tuber. From these practical calculation results, one kg of dry cassava tuber could be biologically converted to 497.01 L of biogas, and one kg of fresh cassava tuber could produce 235.12 L of biogas. If the energy value of biogas (50-70% of methane content) was 22000-26000 kJ/m$^3$, one kg of fresh and dry cassava tubers used as raw materials for biogas production, could produce 5172.64 kJ and 10934.22 kJ energy, respectively

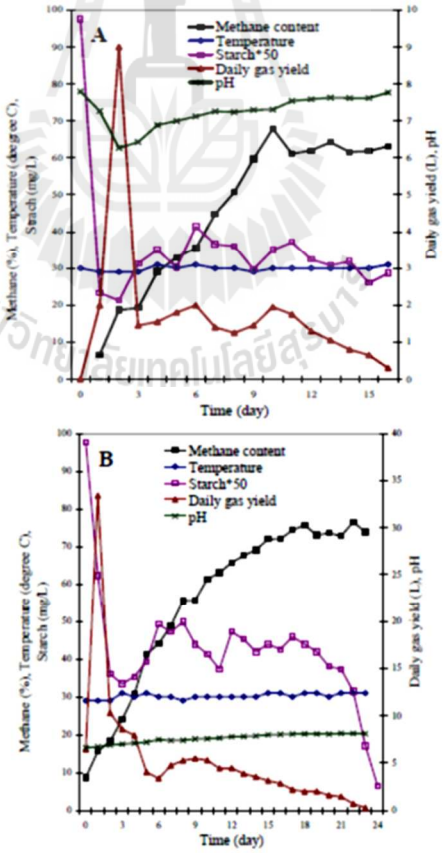



**Fig. 4** Biogas production from cassava tubers using 1.00% (W/V) total solids and 0.04% (W/V) urea supplement in the single-state digesters of (A) 5-L and (B) 20-L working Volume.

*As. J. Energy Env.* **2007**, 08(01), 444-453 

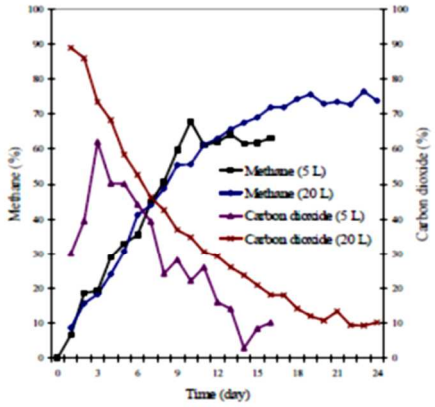



**Fig.5** Methane and carbon dioxide composition of gas measured during cassava tuber fermentation in the single-state digesters of 5-L working volumes.

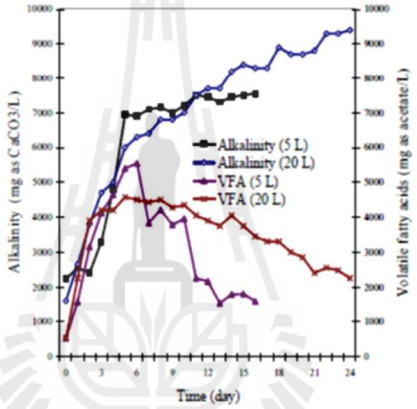



**Fig. 6** Alkalinity and volatile fatty acids measured during biogas production from cassava tubers in the single-state digesters of 5-L and 20-L working volumes.

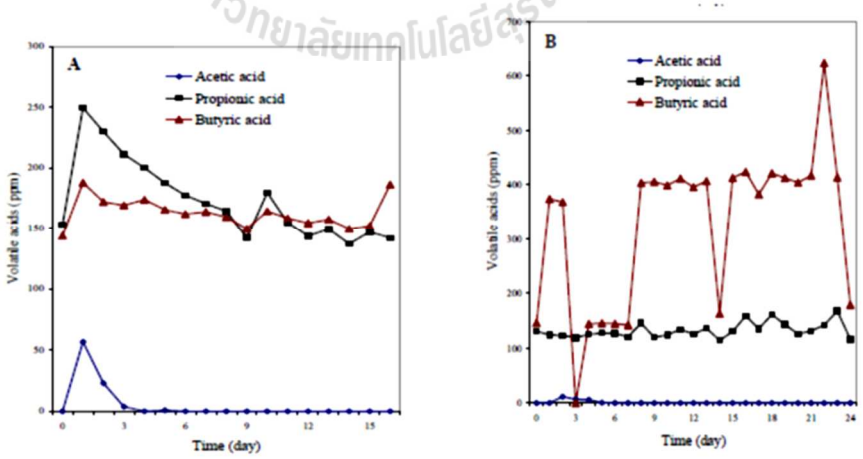



**Fig. 7** Volatile acids accumulation during cassava tuber fermentation in the single-state digesters of (A) 5-L and (B) 20-L working volumes.

**Acknowledgement**

We would like to thank Suranaree University of Technology for financial and laboratory facility supports.

**References**

[1] American Public Health Association (1990) *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th edition, American Public Health Association, Washington, D.C., U.S.A.

[2] Anunputtikul, W. and Rodtong, S. (2004) Investigation of the potential production of biogas from cassava tuber. *Abstracts of the 15th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and JSPS-NRCT Symposium,* p. 70.

[3] Association of Official Analytical Chemists (1990) *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 15th edition, The Association of Official Analytical Chemists, Inc., Arlington, U.S.A.

[4] Bardiya, N., Somayaji, D., and Khanna, S. (1996) Biomethanation of banana peel and pineapple waste, *Bioresource Technology*, **58**, pp. 73-76.

[5] Burford, J.L., and Varani, F.T., (1976) Energy potential through bioconversion of agricultural wastes. *Final Report to the Four Coners Regional commission by Biogas of Colorado Inc. and the Colorado Energy Research Institute* 1976. Colorado. U.S.A.

[6] Carbone, S.R., Dasilva, F.M., Tavares, C.R.G., and Filho, B.P.D. (2000) Bacterial population of a two-phase anaerobic digestion process treating effluent of cassava starch factory, *Environmental Technology*, **23**, pp. 591-597.

[7] Cuzin, N., Farinet, J.L., Segretain, C., and Labat, M. (1992) Methanogenenic fermentation of cassava peel using a pilot plug flow digester, *Bioresource Technology*, **41**, pp. 259-264.

[8] Gales, P.W. (1990) Malt beverages and brewing materials. *In* Helrich, K. (ed.). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, pp. 708-715, 15th Edition, The Association of Official Analytical Chemists, Inc., Arlington, U.S.A.

[9] Kalia, V.C., Sonakya, V., and Raizada, N. (2000) Anaerobic digestion of banana stem waste, *Bioresource Technology*, **73**, pp. 191-193.

[10] Mackie, R.I. and Bryant, M.P. (1995) Anaerobic digestion of cattle waste at mesophilic and thermophilic temperatures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **43**, pp. 346-350.

[11] Milono, P., Lindajati, T., and Aman, S. (1981) Biogas production from agricultural organic residues, *The First ASEAN Seminar-Workshop on Biogas Technology, Working Group on Food waste Materials*, pp. 52-65.

[12] Office of Agricultural Economics (2003) *Agricultural Statistics of Thailand Crop Year* [On-line], Available: http://www.oae.go.th/statistic/yearbook/2001-02.

[13] Pandey, A., Soccol, C.R., Nigam, P., Soccol, V.T., Vanderberghe, L.P.S., and Mohan, R. (2000) Biotechnological potential of agro-industrial residues. II: Cassava bagasses, *Bioresource Technology*, **74**, pp. 81-87.

[14] Plummer, D.T. (1971) *An Introduction to Practical Biochemistry*, McGraw-Hill Book Company Limited, New York, U.S.A.

[15] Polprasert, C. (1989) Organic wastes recycling. *Quoted in* Bitton, G. (1994) *Wastewater Microbiology*, A John Wiley&Sons, New York, U.S.A.