

การผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**COMBINED ENERGY AND ACTIVATED CARBON
PRODUCTION USING GASIFICATION PROCESS**

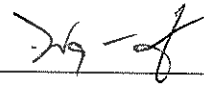


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Agricultural Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2015**

การผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. พงษ์ศักดิ์ จุฑายูเสน)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. วีรชัย อองหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ)

กรรมการ



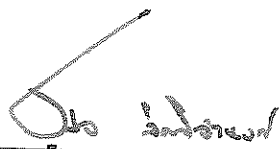
(อ. ดร. พรรษา ลิ้มลิ้ม)

กรรมการ



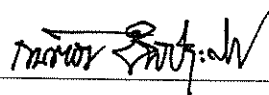
(อ. ดร. วันรัฐ อับดุลากาซิม)

กรรมการ



(ศ. ดร. ชุกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สาวิตรี ประภาการ : การผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้กระบวนการ
แก๊สซิฟิเคชัน (COMBINED ENERGY AND ACTIVATED CARBON PRODUCTION
USING GASIFICATION PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.วีรชัย อัจฉาญ, 92 หน้า

ในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์
จากกะลามะพร้าวโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการป้อนไอน้ำเพื่อ
กระตุ้นถ่านให้มีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิตไฟฟ้า หาอัตราการ
ไหลของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสมที่ให้กำลังการผลิตไฟฟ้า และค่าการดูดซับ ไอ โอดีนของถ่านสูงสุด
โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ ขนาด 100 kW แล้วทดสอบผลิตพลังงานควบคู่การผลิต
ถ่านกัมมันต์ต่อเนื่องด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ ขนาด 250 kW

ผลการศึกษาพบว่า สภาวะการป้อนไอน้ำความดัน 0.5 bar มีความเหมาะสมในการผลิต
พลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบให้
ต่ำลง และยังสามารถเพิ่มค่าการดูดซับ ไอ โอดีนให้ถ่านเพิ่มขึ้น โดยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับ
ต้นแบบ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 65.50 kW ที่อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลสูงสุด 192.50 Nm³/h
อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 1.88 kg/kW สัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล 0.10 kg_{steam}/kg_{biomass}
อัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ 9.87 kg/h ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวมวล 45.56 % และ
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 10.30 % ค่าการดูดซับ ไอ โอดีนของถ่านกัมมันต์ 600.00 mgI₂/g และ
ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 160.10 kW ที่อัตราการไหลของแก๊ส
ชีวมวลสูงสุด 502.5 Nm³/h อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 1.25 kg/kW สัดส่วนการป้อนไอน้ำต่อ
ชีวมวล 0.20 kg_{steam}/kg_{biomass} อัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ 10.05 kg/h ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊ส
ชีวมวล 64.88 % ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 15.54 % ค่าการดูดซับ ไอ โอดีนของถ่านกัมมันต์
824.09 mgI₂/g และถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็ก 82 % ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์
เกี่ยวกับการดูดซับแก๊ส และไอระเหย

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการผลิตพลังงานควบคู่ถ่านกัมมันต์จากเชื้อเพลิง
กะลามะพร้าว ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต เป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า เพิ่ม
ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อลดการพึ่งพิงการนำเข้า
พลังงานจากต่างประเทศ ช่วยเพิ่มภาพลักษณ์ในเชิงบวกของอุตสาหกรรม และเป็นการใช้
เทคโนโลยีสะอาด

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา สาวิตรี ประภาการ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วีรชัย อัจฉาญ

SAWITREE PRAPAKARN : COMBINED ENERGY AND ACTIVATED
CARBON PRODUCTION USING GASIFICATION PROCESS. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 92 PP.

ACTIVATED CARBON/COCONUT SHELL/ENERGY/GASIFICATION/STEAM

This study aims to investigate the combined energy and activated carbon production from coconut shell using gasification process. The proper conditions for supplying steam were conducted in order to stimulate charcoal to be activated charcoal without affecting electricity generation, and the syngas flow rate that provides the highest power of electricity generation and iodine number. For pilot scale (100 kW) and commercial scale (250 kW) gasification experiment, it was found that 0.5 bar of pressurized steam is appropriate for combined power and activated carbon production since it did not decrease the electric power in the production system. Moreover, it could add more value of iodine number to the charcoal. Pilot scale gasification process can produce 65.50 kW of electricity at the maximum syngas flow rate of 192.50 Nm³/h; specific biomass consumption of 1.88 kg/kW; steam/biomass of 0.10 kg_{steam}/kg_{biomass}; charcoal production rate of 9.87 kg/h; cold - gas efficiency of 45.56 %; electrical efficiency of 10.30 %; iodine number of 600.00 mgI₂/g. However, commercial scale gasification process can produce 160.10 kW of electricity at the maximum syngas flow rate of 502.50 Nm³/h; specific biomass consumption of 1.25 kg/kW; steam/biomass of 0.20 kg_{steam}/kg_{biomass}; charcoal production rate of 10.05 kg/h; cold - gas efficiency of 64.88 %; electrical efficiency of 15.54 %; iodine number of 824.09 mgI₂/g; and micropore volume of 82 %. Therefore, it is proper for use as gas and vapor absorption.

These results indicated that combined energy and activated carbon production from coconut shell, which is waste from the production, is a good method to show resource and energy efficiency as well as alternative energy development for decreasing number of energy imports. Also, it helps making the best of industry with clean technology.



School of Agricultural Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature ศิริวิทย์ งามนร

Advisor's Signature พ.พ.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย ออาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจกับผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ ดร.ทิพย์สุภินทร์ หินชุย และ คุณศรีลย์ ปานศรีพงษ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจกับผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสนา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และ อาจารย์ ดร.วันรัฐ อับดุลลากาซิม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

คุณสุภัทร หนูแย้ม คุณปภัส ชนะโรก คุณกฤษกร รัชสมบัติ คุณกิตติยาภรณ์ รongเมือง คุณชนันซ์ มุขพันธ์ อาจารย์วิเชียร ดวงสีเสน คุณจิรศักดิ์ ปาประกอบ คุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ และบุคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำปรึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บริษัท อำพลฟู้ดส์ โพรเซสซิ่ง จำกัด ที่สนับสนุนโรงไฟฟ้าแก๊สซิฟิเคชั่น สถานที่พนักงาน และอื่นๆ เพื่อทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จตามบรรลู่วัตถุประสงค์

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ที่ดี ให้แก่ผู้วิจัย และสำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งที่ให้การเลี้ยงดู อบรม สนับสนุน ส่งเสริมการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และมีหลักธรรมในการดำเนินชีวิตที่ดีตลอดมา

สาวิตรี ประภาการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
2 ปรัชมนวัตกรรมกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน.....	5
2.2 ทฤษฎีถ่านกัมมันต์.....	8
2.2.1 ประเภทถ่านกัมมันต์.....	9
2.2.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	10
2.2.3 การใช้ประโยชน์ถ่านกัมมันต์.....	13
2.2.4 มาตรฐานถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย	14
2.2.5 ข้อมูลถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในท้องตลาด	14
2.2.6 ข้อมูลด้านการตลาดของสินค้าถ่านกัมมันต์ในปัจจุบัน	15
2.2.7 ข้อมูลผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.3.1	แก๊สซิฟิเคชัน.....	17
2.3.2	ถ่านกัมมันต์.....	19
2.3.3	การผลิตถ่านกัมมันต์ร่วมกับแก๊สซิฟิเคชัน.....	22
3	เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย	24
3.1	บทนำ	24
3.2	ขั้นตอนการศึกษา	24
3.3	ตัวอย่างและอุปกรณ์	24
3.3.1	ตัวอย่าง	24
3.3.2	การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	24
3.3.2.1	การเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิง	24
3.3.2.2	การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ	26
3.3.2.3	การศึกษาสมบัติแบบประมาณ	27
3.3.2.4	การศึกษาสมบัติแบบแยกธาตุ.....	28
3.3.3	อุปกรณ์และเครื่องมือวัด	28
3.3.3.1	ระบบแก๊สซิฟิเคชัน	28
3.3.3.2	ชุดกระตุ้นถ่านกัมมันต์	28
3.3.3.3	การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ.....	29
3.4	วิธีการดำเนินงานวิจัย	34
3.4.1	การทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสม	34
3.4.1.1	การศึกษาอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล	36
3.4.1.2	สมบัติของแก๊สชีวมวล	36
3.4.1.3	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์	36
3.4.1.4	กำลังการผลิตไฟฟ้า.....	36
3.4.1.5	อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล.....	36
3.4.1.6	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	37
3.4.1.7	อัตราการเกิดถ่าน	37
3.4.1.8	อัตราการไหลของไอน้ำ.....	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1.9	ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน.....	37
3.4.1.10	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ.....	38
3.4.1.11	ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า.....	39
3.4.2	การทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม.....	39
3.4.3	การทดสอบหาเวลาการกระตุ้น.....	40
3.4.4	การผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับพาณิชย์.....	40
3.4.4.1	การทดสอบเบื้องต้น.....	40
3.4.4.2	การเดินระบบต่อเนื่อง.....	41
3.4.4.3	การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	42
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล.....	44
4.1	บทนำ.....	44
4.2	ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบกะลามะพร้าว.....	44
4.2.1	คุณสมบัติทางกายภาพ.....	44
4.2.2	องค์ประกอบแบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อน.....	45
4.3	ผลการทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ.....	47
4.3.1	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีววมวล.....	47
4.3.2	สมบัติของแก๊สชีววมวล.....	48
4.3.3	สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบการผลิตพลังงาน.....	51
4.3.4	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	52
4.3.5	สรุปปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์.....	52
4.4	ผลการทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ.....	54
4.4.1	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีววมวล.....	54
4.4.2	สมบัติของแก๊สชีววมวล.....	55
4.4.3	สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน.....	57

สารบัญ (ต่อ)

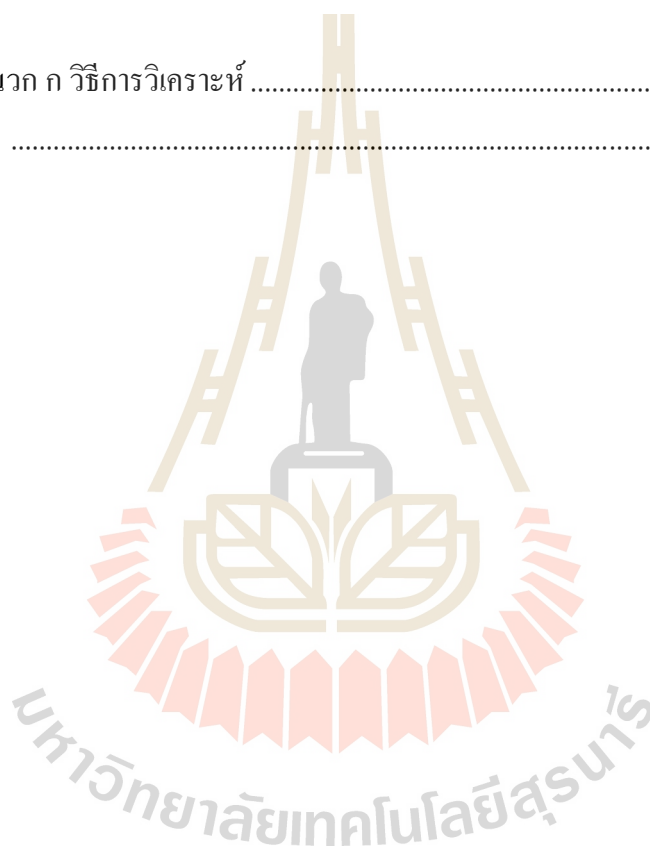
หน้า

4.4.4	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	57
4.4.5	สรุปอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสมในการผลิตพลังงาน ควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์	57
4.5	ผลการทดสอบหาเวลาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซ้ำ.....	60
4.5.1	คุณสมบัติทางกายภาพ.....	60
4.5.2	องค์ประกอบแบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อน.....	60
4.5.3	ค่าการดูดซับไอโอดีน	60
4.6	สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบ แก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ.....	63
4.7	ผลการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน ระดับเชิงพาณิชย์.....	63
4.7.1	ผลการทดสอบเบื้องต้น	63
4.7.2	ผลการเดินระบบต่อเนื่อง	67
4.7.2.1	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีววมวล.....	67
4.7.2.2	สมบัติของแก๊สชีววมวล	68
4.7.2.3	สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน	69
4.7.2.4	คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์	69
4.7.3	ผลการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานควบคู่ การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์	70
4.7.3.1	รายได้.....	70
4.7.3.2	ค่าใช้จ่าย	71
4.7.3.3	ผลตอบแทน	71
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1	บทนำ	73
5.2	ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน ระดับเชิงพาณิชย์.....	74
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง	76
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	82
ประวัติผู้เขียน	92



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อมูลผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศในปัจจุบัน	17
3.1	สัญลักษณ์สภาวะการทดลอง	26
3.2	ความสามารถในการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ในการศึกษา	29
3.3	การวัดพารามิเตอร์ต่างๆ	29
4.1	รายละเอียดการคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์	71
4.2	รายละเอียดผลตอบแทนของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์	72

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	6
3.1	ขั้นตอนการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	25
3.2	ตัวอย่างวัตถุดิบกะลามะพร้าว	27
3.3	ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้	30
3.4	ชุดกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	31
3.5	แผนผังชุดกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	31
3.6	เครื่องมือวัด	32
3.7	ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล	33
3.8	ตำแหน่งการวัด	34
3.9	ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสม	35
3.10	ขั้นตอนการทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสม	41
3.11	ขั้นตอนการทดสอบหาเวลาการกระตุ้นซ้ำ	42
3.12	ขั้นตอนการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์	43
4.1	ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบกะลามะพร้าว	46
4.2	องค์ประกอบแบบประมาณและค่าความร้อนของวัตถุดิบกะลามะพร้าว	46
4.3	องค์ประกอบแบบแยกธาตุของวัตถุดิบกะลามะพร้าว	47
4.4	ลักษณะอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล ณ ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ (T1_PGS - T6_PGS) ที่สภาวะการป้อนไอน้ำความดัน 0.0 0.5 และ 1.0 bar	48
4.5	ผลกระทบของปริมาณไอน้ำที่ความดันต่างๆ ต่อค่าองค์ประกอบของแก๊สชีวมวล	49
4.6	ผลของสัดส่วนไอน้ำต่อชีวมวล (Steam/Biomass) กับองค์ประกอบของแก๊สชีวมวล	50
4.7	ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล กรณีทดสอบหาสภาวะการป้อนไอน้ำที่เหมาะสม	50
4.8	ผลของสัดส่วนไอน้ำต่อชีวมวล (Steam/Biomass) กับค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน กรณีทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสม 53
4.10	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ กรณีทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสม 54
4.11	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคนิวตริโนในเตาผลิตแก๊สชีวมวล กรณีทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสม..... 55
4.12	สมบัติของแก๊สชีวมวล กรณีทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสม..... 56
4.13	ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล กรณีทดสอบหาอัตราการไหล ของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสม 56
4.14	สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน กรณีทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสม..... 58
4.15	ค่าการดูดซับไอโอดีน กรณีทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสม 59
4.16	ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังกระตุ้นซ้ำ 61
4.17	คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังกระตุ้นซ้ำ..... 62
4.18	ผลของปริมาณไอน้ำกับค่าการดูดซับไอโอดีน กรณีผลิตพลังงานควบคู่ การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์..... 64
4.19	ลักษณะผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์ด้วย SEM 65
4.20	การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคนิวตริโนในเตาผลิตแก๊สชีวมวล กรณีผลิตพลังงานควบคู่การผลิต ถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ 68
4.21	ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ กรณีผลิตพลังงานควบคู่การผลิต ถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ 70

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

V_g	=	อัตราการไหลของแก๊สชีววมวล (Nm^3/h)
G_c	=	องค์ประกอบแก๊สชีววมวล (%)
m_{bio}	=	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (kg/h)
m_{ash}	=	ปริมาณการเกิดถ่าน (kg/h)
P	=	ความดันไอน้ำ (bar)
Q	=	อัตราการไหลของไอน้ำ (kg/h)
TS	=	อุณหภูมิไอน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)
LHV_{bio}	=	ค่าความร้อนต่ำของวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิง (MJ/kg)
PGS	=	ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ
CGS	=	ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์
$T1_{\text{PGS}}$	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลระดับต้นแบบ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 0.66 m จากระดับอ้างอิง
$T2_{\text{PGS}}$	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลระดับต้นแบบ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 1.06 m จากระดับอ้างอิง
$T3_{\text{PGS}}$	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลระดับต้นแบบ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 1.46 m จากระดับอ้างอิง
$T4_{\text{PGS}}$	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลระดับต้นแบบ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 1.86 m จากระดับอ้างอิง
$T5_{\text{PGS}}$	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลระดับต้นแบบ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 2.28 m จากระดับอ้างอิง
$T6_{\text{PGS}}$	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลระดับต้นแบบ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 2.70 m จากระดับอ้างอิง
$T1_{\text{CGS}}$	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลระดับเชิงพาณิชย์ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 1.50 m จากระดับอ้างอิง
$T2_{\text{CGS}}$	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลระดับเชิงพาณิชย์ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 3.00 m จากระดับอ้างอิง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T3_CGS	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวลระดับเชิงพาณิชย์ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 4.50 m จากระดับอ้างอิง
T4_CGS	=	อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวลระดับเชิงพาณิชย์ ณ ตำแหน่งที่ความสูง 6.00 m จากระดับอ้างอิง
PGS_S0.0	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีไม่ป้อนไอน้ำ
PGS_S0.5	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีป้อนไอน้ำเข้าเตาผลิตแก๊สชีวมวล 0.5 bar
PGS_S1.0	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีป้อนไอน้ำเข้าเตาผลิตแก๊สชีวมวล 1.0 bar
PGS_F180	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล 180 Nm ³ /h
PGS_F190	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล 190 Nm ³ /h
PGS_F200	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล 200 Nm ³ /h
PGS_T30	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีระยะเวลาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ช้า 30 min
PGS_T60	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีระยะเวลาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ช้า 60 min
PGS_T120	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ กรณีระยะเวลาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ช้า 120 min
CGS_SR0.0	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ กรณีไม่ป้อนไอน้ำ
CGS_SR0.5	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ กรณีป้อนไอน้ำเข้าเตาผลิตแก๊สชีวมวล 0.5 bar
CGS_SR1.0	=	สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ กรณีป้อนไอน้ำเข้าเตาผลิตแก๊สชีวมวล 1.0 bar

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- CGS_SA0.5 = สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน
ระดับเชิงพาณิชย์ กรณีป้อนไอน้ำเข้าห้องผลิตถ่านกัมมันต์ 0.5 bar
- CGS_SA1.0 = สภาวะการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน
ระดับเชิงพาณิชย์ กรณีป้อนไอน้ำเข้าห้องผลิตถ่านกัมมันต์ 1.0 bar



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และประเทศผู้ส่งออกสินค้าเกษตรเป็นอันดับต้นๆ ของโลก ปัจจุบันการแข่งขันด้านการตลาดของตลาดโลกมีความเข้มงวดมากขึ้น โดยการกำหนดเงื่อนไข และมาตรฐานเข้ามาเพื่อเป็นข้อกีดกันทางการค้า เช่น มาตรฐานด้านคุณภาพสินค้า มาตรฐานด้านเทคโนโลยี มาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งล้วนมีความเกี่ยวข้องกันทั้งทางตรง และทางอ้อม อาทิ การนำพลังงานสะอาดหรือพลังงานทดแทนมาใช้ในกระบวนการผลิตอาหารเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลิตภัณฑ์ที่เน้นคุณค่าทางสิ่งแวดล้อมจะได้ฉลากสิ่งแวดล้อม (Eco - labelling) ดังกล่าว การพัฒนาศักยภาพ และส่งเสริมขีดความสามารถด้านอุตสาหกรรม จึงต้องควบคู่ทั้งการปรับปรุงคุณภาพของสินค้า และการพัฒนาด้านเทคโนโลยี โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ

การพัฒนาเทคโนโลยี และวิทยาการสมัยใหม่เพื่อเพิ่มผลผลิตแทนการเพิ่มการใช้ปัจจัยการผลิต มุ่งเน้นการเชื่อมโยงกิจกรรมในภาคเกษตร และอุตสาหกรรมโดยการนำจุดแข็งของประเทศไทยที่มีศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลมาพัฒนาควบคู่กันกับการใช้เทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ตลอดจนการสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง การเพิ่มมูลค่า และคุณค่าของผลิตภัณฑ์เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะนำไปสู่การยกระดับอุตสาหกรรมไทยให้สามารถขับเคลื่อนไปได้อย่างยั่งยืน

กระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานทดแทนในรูปแบบแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ถือเป็นวิธีการผลิตพลังงานจากชีวมวลที่เหมาะสม โดยจุดเด่นของเทคโนโลยีนี้ คือ เป็นเทคโนโลยีที่ถูกยอมรับว่ามีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถแปรรูปพลังงานกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในเชิงพาณิชย์ (Stiegel et al., 2001; Mckendry, 2002; Arjham et al., 2012) ปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวถูกใช้ในต่างประเทศอย่างกว้างขวาง สำหรับประเทศไทยขยายผลมาใช้ในการระดับโรงงานอุตสาหกรรมแล้วเช่นกัน

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันจะอาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermo-chemical Conversion Process) ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศหรือออกซิเจน (Partial Oxidation) ซึ่งเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) ในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนี้เป็นระบบที่มีความดันต่ำ ไม่มีอันตราย (Klein, 2002) แก๊สเชื้อเพลิงนี้สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยตรง โดยส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) เพื่อผลิตไฟฟ้าหรือป้อนแก๊สเข้าไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ แล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้าหรือนำความร้อนของไอน้ำไปใช้ประโยชน์อื่น ยิ่งไปกว่านั้นผลพลอยได้จากกระบวนการ คือ ถ่าน ที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงได้ (Nowell et al., 1999; Petersen et al., 2005) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบดั้งเดิมนี้ เรียกว่า Conventional Gasification Technology ซึ่งยังมีจุดด้อยคือ ไม่สามารถเพิ่มคุณภาพของผลพลอยได้จากถ่าน จากกระบวนการให้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้ อย่างไรก็ตามแนวทางที่จะเพิ่มทั้งประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และเพิ่มคุณภาพของถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง มีความเป็นไปได้อย่างยิ่ง เนื่องจากมีงานวิจัยที่สนับสนุนว่าการนำไอน้ำเข้ามาเป็นตัวกระตุ้นในกระบวนการทางอุณหเคมีที่เรียกว่า กระบวนการไอน้ำแก๊สซิฟิเคชัน (Steam Gasification) สามารถเพิ่มทั้งคุณภาพของถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ คือ ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ส่งผลให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างๆ กัน คือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดเล็กใหญ่ขึ้น การสร้างรูพรุนใหม่ทำให้ถ่านมีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น กระบวนการดังกล่าวนี้ยังสามารถเพิ่มผลผลิตของแก๊สไฮโดรเจนได้ จึงมีผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบสูงขึ้นด้วย (วิรัช อัจหาญ และคณะ, 2553; Lv et al., 2004; Hernandez et al., 2012) อย่างไรก็ตามจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการศึกษากระบวนการผลิตพลังงานในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ควบคู่กับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้นในระดับโรงงานอุตสาหกรรมยังไม่มีงานวิจัยปรากฏ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตพลังงาน และเพิ่มมูลค่าให้กับกะลามะพร้าวซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยความเป็นนวัตกรรมของงานวิจัย คือ การพัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงโดยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำควบคู่กับการผลิตพลังงานที่สามารถพัฒนานำไปใช้ประโยชน์กับโรงไฟฟ้าชีวมวลเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสำหรับอุตสาหกรรมได้ โดยมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อขยายผลออกสู่การใช้ประโยชน์ต่อผู้ประกอบการ ภาคอุตสาหกรรมในวงกว้างในรูปแบบของนวัตกรรมใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทดแทน และการเพิ่มมูลค่า

ของผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรม ผลการศึกษาที่ได้จะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย และสร้างนวัตกรรมใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม โดยการนำเอาวัสดุเหลือใช้มาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงาน และเพิ่มมูลค่าผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นที่มีความเป็นไปได้ทั้งทางด้านเทคนิค ความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะนำไปสู่อุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง แต่ใช้พลังงานน้อยสามารถลดต้นทุนการผลิตเพื่อให้อุตสาหกรรมไทยมีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศ และมีสัดส่วนการส่งออกในตลาดโลกเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ
- 2) เพื่อศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์
- 3) เพื่อศึกษาคูณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์
- 4) เพื่อศึกษาด้านทุนการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในระดับเชิงพาณิชย์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โดยภาพรวมของขอบเขตการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1.3.1 ใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ ขนาด 100 kW ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ณ จังหวัดนครราชสีมา ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว แล้วนำผลการศึกษาดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ ขนาด 250 kW ของบริษัท อำพลฟู้ดส์ โพรเซสซิ่ง จำกัด ณ จังหวัดนครปฐม

1.3.2 ในการศึกษาครั้งนี้ นำผลไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์ ดังนั้น วัตถุประสงค์ที่ใช้จึงเป็นกะลามะพร้าวทั่วไป ไม่จำกัดแหล่งที่มา และสายพันธุ์

1.3.3 ในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ ใช้ไอน้ำความดัน 0.5 bar ที่อัตราการไหล 12 kg/h และ 1.0 bar ที่อัตราการไหล 20 kg/h อุณหภูมิเฉลี่ย 110 - 120 °C

1.3.4 ไอ้ที่ใ้ใช้ในการป้อนเข้าระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ ใช้ไอ้ที่ความดัน 0.5 bar ที่อัตราการไหล 40 kg/h และ 1.0 bar ที่อัตราการไหล 60 kg/h

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ประโยชน์ที่ได้รับ คือ ผลการศึกษาที่จะเป็นองค์ความรู้ด้านการผลิตพลังงานควบคู่การผลิต ถ่านกัมมันต์ โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สำหรับนำไปใช้งานจริงในระดับโรงงาน อุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ และเป็นการเพิ่มองค์ความรู้ใหม่ในงานวิจัยด้านพลังงานทดแทน และการเพิ่มมูลค่าเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจาก โรงงานอุตสาหกรรม



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

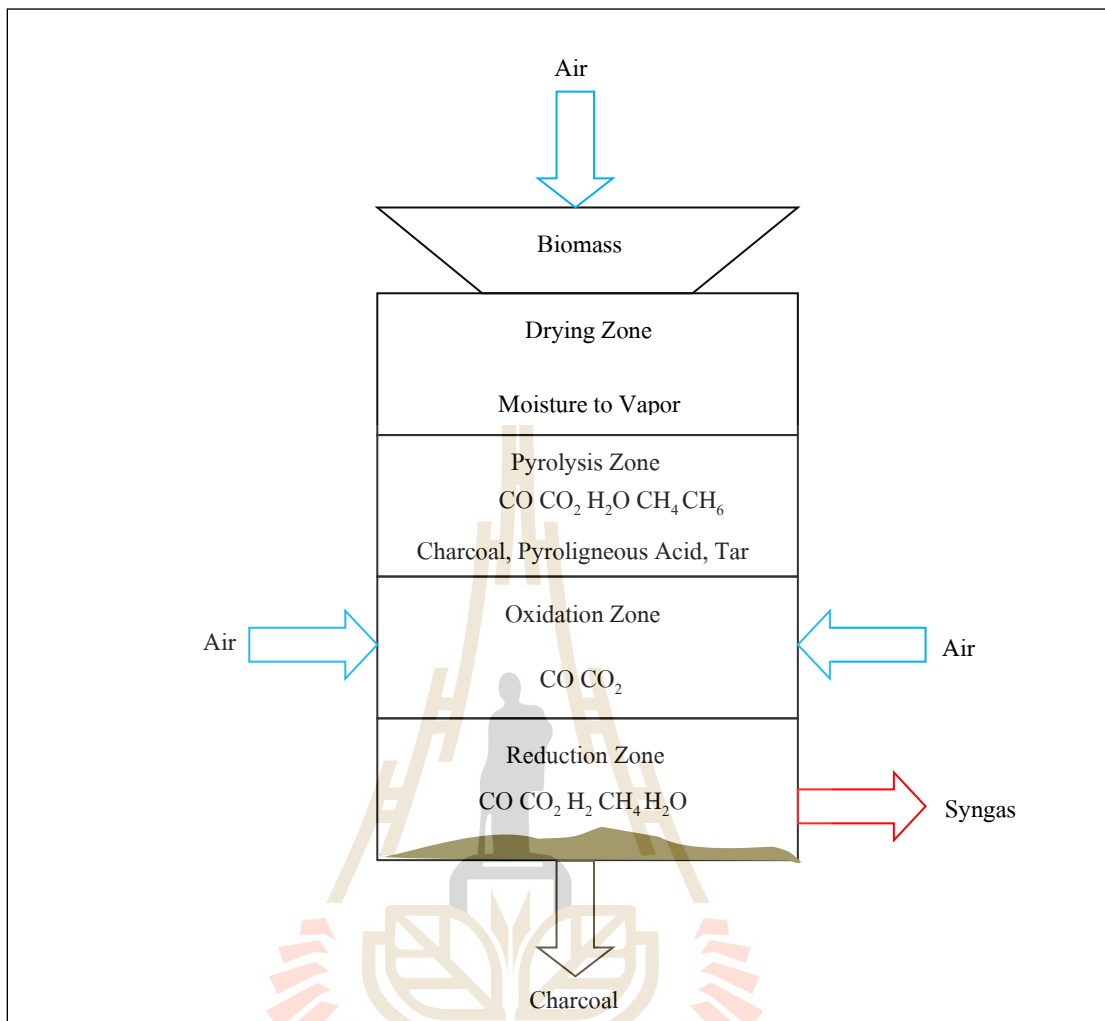
2.1 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของ Basu (2010); Kanniappan (2013); Buragohain et al. (2010); Parvez et al. (2016) เป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่จุดไฟติด และมีค่าความร้อนสูงโดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหภูมิสูงซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน ซึ่งสถานะที่ทำให้เกิดแก๊สดังกล่าว คือ สถานะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ เป็นสถานะที่มีการจำกัดปริมาณอากาศหรือแก๊สออกซิเจน เพราะหากมีแก๊สออกซิเจนเพียงพอหรือมากเกินไปจะกลายเป็น กระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำออกมา ซึ่งไม่คิดไฟ ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 4 โซน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยโซนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอธิบายได้ ดังต่อไปนี้

โซนเผาไหม้ (Combustion หรือ Oxidation Zone) เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลจะลุกไหม้เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอน และไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Cleveland, 2004) ดังสมการที่ (2.1) - (2.2)

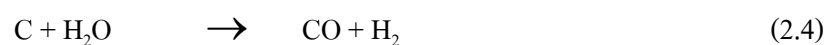
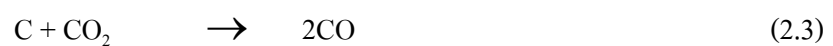


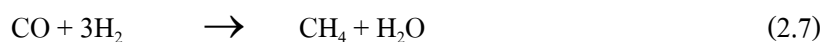
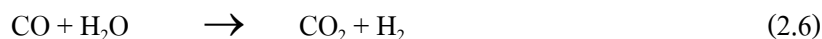
ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.1) - (2.2) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซนรีดักชัน และโซนไพโรไลซิส



รูปที่ 2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

โซนรีดักชัน (Reduction Zone) แก๊สร้อนที่ผ่านมาจากโซนเผาไหม้จะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ในโซนนี้มีอุณหภูมิระหว่าง 500 - 900 °C ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และน้ำ ไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และมีเทน (Cleveland, 2004) ดังสมการที่ (2.3) - (2.5)





ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.3) เรียกว่า Boundouard ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.4) เรียกว่า Steam-carbon และปฏิกิริยาในสมการที่ (2.5) เรียกว่า Hydrogasification แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสามเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีววมวลนี้ จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

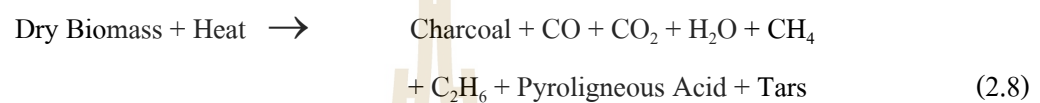
ในโซนของรีดักชันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีววมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีววมวล ดังนั้นขนาด และปริมาณของเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้ จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีววมวลขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตา และจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีววมวลมีค่าต่ำ

แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามากจึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้น และแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิในโซนรีดักชันสูงกว่า 900 °C แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90 % จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100 °C จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซนรีดักชัน

ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซนเผาไหม้ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซนรีดักชันจะทำให้อุณหภูมิจากแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ (2.4) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500 - 600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีววมวลมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.6) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water - gas Shift ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้น

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่สูงจนเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการรีดักชันแก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (2.7) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methanation

โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) รับความร้อนจากโซนรีดักชันทำให้สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ ในโซนนี้มีอุณหภูมิระหว่าง 200 - 500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการ คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำการปฏิกิริยาต่อในโซนรีดักชัน และโซนเผาไหม้ ปฏิกิริยาในโซนนี้ ดังสมการที่ (2.8)



โซนทำแห้ง (Drying Zone) ในโซนนี้ความร้อนจะลดลงมากทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาได้ ในโซนนี้มีอุณหภูมิระหว่าง 100 - 200 °C

นอกจากทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชันแล้วยังมีอีกทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ ทฤษฎีถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นมีความสมบัติเป็นถ่าน ยังไม่มีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ จึงจำเป็นต้องกระตุ้นให้มีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มมูลค่า มีรายละเอียดของทฤษฎีในหัวข้อถัดไป

2.2 ทฤษฎีถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) ชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตขึ้นมาโดยผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) ซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal Surface Area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากเกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน จากสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ถ่าน ไม้ และแกรไฟต์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้น ไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่น

ถ่านกัมมันต์ (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์, 2550) เป็นถ่านที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพก่อนเพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านเกิดรูพรุนหรือรอยแตกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจำนวนมหาศาล ซึ่งพื้นที่ผิวภายในผนังรูพรุน

หรือรอยแตกเหล่านั้นทำให้เกิดพื้นที่ว่างขนาดใหญ่ที่อนุภาคสาร และ โมเลกุลแก๊สจำนวนมากสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือถูกกักอยู่ในถ่าน โดยทั่วไปคนส่วนใหญ่จะรู้จัก และคุ้นเคยกับการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกรองน้ำ แต่นอกเหนือจากการกรองน้ำแล้ว ถ่านชนิดนี้ยังนิยมใช้กรองสาร และเป็นวัสดุดูดซับในหลายอุตสาหกรรมด้วย

การดูดซับอนุภาคหรือโมเลกุลแก๊สของถ่านกัมมันต์เป็นปฏิกิริยาทางกายภาพโดยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ซึ่งเมื่อใช้งานไประยะหนึ่งประสิทธิภาพในการกรองหรือดูดซับสารจะต่ำลง เนื่องจากที่ว่างภายใน โครงสร้างถ่านมีน้อยลง ผู้ใช้งานจึงต้องทำการเปลี่ยนถ่ายถ่านเก่าออก และใส่ถ่านใหม่เข้าไปทดแทน โดยถ่านที่ถูกใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ด้วยการนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นซ้ำ (Re - activated) เพื่อกำจัดสารต่างๆ ที่ถ่านดูดซับไว้ทั้งหมดก่อน โดยถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) เป็นค่าสำคัญที่ใช้ออกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากไอโอดีนถูกถ่านดูดซับได้ดี ดังนั้นค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ โดยวัดเป็นมิลลิกรัมของไอโอดีนต่อน้ำหนักถ่าน 1.00 g และเถ้า (Ash) เป็นค่าที่ถ้ามีสูงจะลดประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ และลดประสิทธิภาพการนำถ่านไปกระตุ้นซ้ำ

ทั้งนี้ประเภท กระบวนการผลิต การใช้ประโยชน์ มาตรฐาน ข้อมูลที่จำหน่ายในท้องตลาด ข้อมูลด้านการตลาดในปัจจุบัน และข้อมูลผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ประเภทถ่านกัมมันต์

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้ปัจจุบันผู้ผลิตสามารถผลิตถ่านออกมาได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้นจึงมีวิธีการแบ่งประเภทถ่านกัมมันต์หลายแบบ แต่วิธีที่นิยมใช้ทั่วไป คือ การแบ่งตามลักษณะทางกายภาพของถ่าน (วีรชัย อัจหาญ และคณะ, 2554) ดังนี้

ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powdered Activated Carbon, PAC) ถ่านกัมมันต์ผงเป็นรูปแบบดั้งเดิมของถ่านกัมมันต์ที่ยังนิยมใช้ในทุกวันนี้ โดยทั่วไปขนาดของผงถ่านกัมมันต์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15 - 0.25 mm ถ่านกัมมันต์ในรูปผงมีจุดเด่นตรงตัวถ่านกัมมันต์มีสัดส่วนของพื้นที่ผิวออกต่อปริมาตรมาก ถ่านกัมมันต์ผงจึงเหมาะกับการใช้งานแบบเติมลงในภาชนะของเหลวโดยตรงมากกว่าการบรรจุในท่อ และปล่อยของเหลวไหลผ่านผงถ่านกัมมันต์ เนื่องจากวิธีหลังจะสูญเสียผงถ่านได้ง่ายกว่า

ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ถ่านกัมมันต์ในรูปเกล็ดนิยมใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอของสาร เนื่องจากขนาดเกล็ดใหญ่กว่าผงทำให้แก๊สไหลผ่านได้ง่ายกว่า

ถ่านกัมมันต์อัดแท่ง (Extruded Activated Carbon, EAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ประมาณ 0.80 - 4.50 mm ถ่านประเภทนี้เหมาะกับการกรองหรือดูดซับแก๊ส เนื่องจากทำให้ความดันแก๊สตก (Pressure Drop) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ถ่านอัดแท่งยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง อีกทั้งทำให้เกิดละอองฝุ่นน้อยด้วย

ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่ได้เติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไปในโครงสร้าง เช่น อนุภาคโลหะเงิน ทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ นอกเหนือจากสมบัติในการกรองสาร ดังนั้นจึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำของเครื่องกรองน้ำ

ถ่านกัมมันต์เคลือบโพลิเมอร์ (Polymers Coated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่ถูกเคลือบด้วยสารโพลิเมอร์บางชนิดที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatible Polymer) โดยใช้เทคนิคพิเศษ ซึ่งชั้นเคลือบโพลิเมอร์มีสมบัติยอมให้สารบางอย่างผ่านไปได้ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ถูกใช้เป็นตัวดูดซับสารพิษหรือยาสำหรับกระบวนการฟอกเลือด

2.2.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิด ลักษณะ และสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ และวิธีการกระตุ้นทางเคมี (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2554) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วิธีที่ 1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้กระบวนการออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (Saturated Vapor) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สออกซิเจน (O₂) และอากาศ (Air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับทาร์ (Tar) ที่เหลืออยู่ และคาร์บอนอะตอมในถ่านกัมมันต์เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) กับบางส่วนของเม็ดถ่าน ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ส่งผลให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างๆ กัน คือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้ถ่านมีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยทั่วไป ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ก. การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง พลาสติก ถ่านหิน และพีท เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนซ์

ข. คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

คาร์บอนไนเซชันหรือกระบวนการผลิตถ่าน เป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเกิดจากการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 °C ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หลัก 3 ประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า ทาร์ (Tar) และส่วนที่เป็นแก๊ส (Gas) คาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในวัตถุดิบโดยใช้ความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของของเหลว และแก๊ส มีผลให้ชาร์เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงเกินกว่าวัตถุดิบ โดยกระบวนการคาร์บอนไนเซชันมีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการอ่อนตัว (Softening Period) ควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำเพื่อให้แก๊ส และทาร์ที่สลายตัวหลุดออกได้โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นของแข็งอุดแน่นในรูพรุน และช่วงหลังการอ่อนตัว (After Softening Period) อัตราการให้ความร้อนปกติ เป็นช่วงที่คาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นระเบียบกว่า ช่วงการอ่อนตัว ถ่านชาร์ที่ได้จะแข็ง และมีความหนาแน่นสูงขึ้นแต่ยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะยังมีทาร์ตกค้างอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นต่อไป

ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของถ่านชาร์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการเพิ่มความร้อน และธรรมชาติของวัตถุดิบ (Punsuwan et al., 2015) อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกหักตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และแก๊สต่างๆ หลุดออกไป ส่วนที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบวงแหวนอะโรมาติก ซึ่งคาร์บอนจะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการเพิ่มความร้อนนั้นมีความสำคัญต่อปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการผลิตถ่าน ถ้าอัตราการเพิ่มความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับวัตถุดิบที่มีอัตราการเพิ่มความร้อนต่ำ

ค. การกระตุ้น

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก 1) การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่างไว้ โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน 2) การเพิ่มความว่างไว้ ในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่างไว้ในการดูดซับสูงขึ้น และ 3) การกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ

โดยขั้นตอนนี้จะมีตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing Gas) เช่น ไออน้ำ อากาศ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไปทำการออกซิไดซ์น้ำมันดินหรือทาร์ และอะตอมของคาร์บอน บางตัวในโครงสร้างผลึกในสภาวะที่ควบคุมไว้ทำให้รูพรุนกว้างมากขึ้น และทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น (วีรัชย์ อาหาญ และคณะ, 2552) ดังนี้

1) การกระตุ้นด้วยไออน้ำ (Activation with Steam) ปฏิกริยานี้ใช้ไออน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) ดังนั้นจึงต้องทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 760 - 950 °C ดังสมการที่ (2.9)



อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,000 °C เพราะปฏิกิริยาจะกลายเป็น Diffusion Controlled Rate ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกจำนวนมากจะถูกเผาไหม้ทำให้ขนาด และความพรุนของอนุภาคเล็กลง

2) กระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Activation with Carbon Dioxide) ปฏิกริยานี้ใช้ตัวคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน ดังสมการที่ (2.10)



ปฏิกริยานี้จะต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไออน้ำจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 850 - 1,100 °C อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับวัสดุคิบที่ใช้ด้วย ในทางเทคนิคการปฏิบัติจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเผาไหม้ ซึ่งจะให้ทั้งไออน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้นโดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

3) การกระตุ้นด้วยอากาศ (Activation with Air) ปฏิกริยานี้อาศัยออกซิเจน ในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ (2.11) - (2.12)



การใช้อากาศเพื่อทำการกระตุ้นมีการใช้น้อยมาก ทั้งนี้เพราะว่าการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ลำบากกว่าปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อน อีกทั้งออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ไปทำให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก สำหรับการกระตุ้นทางกายภาพมีข้อดี คือ หลังการกระตุ้นแล้วสามารถนำไปใช้ได้ทันทีไม่ต้องมีปัญหาในการล้างสารที่อาจเป็นอันตราย ส่วนข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิในเผาสูงกว่าวิธีทางเคมีสำหรับรูปทรงของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเล็กกว่าชนิดที่ผลิตด้วยวิธีทางเคมี

วิธีที่ 2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับเนื้อคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อดีของวิธีนี้ คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 - 600 °C) แต่มีข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้ เป็นสารกัดกร่อน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น

สำหรับในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำใช้ความร้อนจากระบบแก๊สซีพีเคชั้นเองเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้เพราะไม่ต้องใช้แหล่งพลังงานจากภายนอก และไม่ต้องคาร์บอนเซชันถ่าน รวมทั้งสามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปใช้งานได้โดยไม่ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีเพิ่ม

2.2.3 การใช้ประโยชน์ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันไปในหลายอุตสาหกรรม แบ่งการใช้ประโยชน์ได้ตามลักษณะรูปร่าง แบบผงละเอียด และแบบเม็ด โดยแบบผงละเอียดสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนแบบเม็ดสามารถนำกลับมา Re - activated เพื่อนำกลับมาใช้ในครั้งต่อไปได้ แบ่งการใช้ประโยชน์ดังนี้

ก. แบบผงละเอียดนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว ได้แก่

- 1) อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ใช้ในการฟอกสี และทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ขึ้น
- 2) อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืชสำหรับการบริโภค ใช้ในการฟอกสี และทำให้มีรสดีขึ้น
- 3) อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการฟอกสี และดูดกลิ่น
- 4) อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และแอสลกอฮอล์ เช่น วิสกี้ ไวน์ น้ำอัดลม ใช้ในการดูดกลิ่น และทำให้รสชาติดีขึ้น

5) อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ เช่น น้ำดื่ม น้ำประปา บำบัด และ
 ดูดซับโลหะหนักอันตราย

ข. แบบเม็ค ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือ
 การทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่

1) อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ใช้ในการดูดแก๊สต่างๆ ที่เป็น
 อันตรายต่อร่างกาย

2) อุตสาหกรรมการทำน้ำกากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้กันทั่วไป
 และใช้ในด้านการทหารเพื่อการดูดซับแก๊สพิษ และไอของสารพิษ

3) อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้ว
 และนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของ
 ไอระเหยต่ำๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น

4) อุตสาหกรรมการผลิตบูทหรือเพื่อกรองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
 และทาร์โดยนำถ่านกัมมันต์บรรจุไว้ที่ก้นกรอง

2.2.4 มาตรฐานถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรฐานเลขที่ 900 - 2532 ได้กำหนดว่า
 ถ่านกัมมันต์ต้องมีค่าความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 0.20 - 0.75 mg/ml ค่าพีเอช เท่ากับ 5.00 - 8.00
 ความชื้นไม่เกิน 8.00 % และค่าการดูดซับไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600.00 mgI₂/g สำหรับเกณฑ์คุณภาพ
 ถ่านกัมมันต์ชั้นที่ 1 และเกณฑ์ถ่านกัมมันต์ชั้นคุณภาพพิเศษต้องมีค่าการดูดซับไอโอดีนไม่น้อยกว่า
 1,000.00 mg I₂/g

2.2.5 ข้อมูลถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในท้องตลาด

ถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในท้องตลาด ทั่วไปผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ กะลามะพร้าว
 โดยตลาดถ่านกัมมันต์แบ่งการใช้งาน ตามการใช้งาน ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องซึ่งมีอยู่มากมาย
 ดังกล่าวข้างต้น ได้แก่ กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องกรองอากาศ อุตสาหกรรมน้ำดื่มและน้ำประปา
 อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้แล้วยังมีการใช้ถ่านกัมมันต์ในครัวเรือน โดย
 เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ดูดซับกลิ่น เช่น กลิ่นอับในตู้เย็น ตู้เสื้อผ้า ตู้รองเท้า ฯลฯ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า
 ตลาดของถ่านกัมมันต์มีอยู่อย่างกว้างขวาง และมีแนวโน้มในการใช้งานอย่างสม่ำเสมอในประเทศ
 และยังสามารถส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศได้ อย่างไรก็ตามยังต้องมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์
 เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการคุณภาพของถ่านกัมมันต์ระดับสูง เช่น อุปกรณ์ฟอกอากาศบางชนิด
 จึงทำให้ยังมีมูลค่าการนำเข้าสูงกว่ามูลค่าการส่งออก (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2552)

ถ่านกัมมันต์เป็นสินค้าที่มีการใช้งานในหลายอุตสาหกรรม ดังนั้นการจำหน่าย
 ส่วนใหญ่เป็นลักษณะการขายตรงเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีการใช้ถ่านกัมมันต์ โดยมี

ระดับราคาแบบผงตันละประมาณ 1 แสนบาท ส่วนแบบเม็ดราคาตันละประมาณ 2 - 6 หมื่นบาท ขึ้นอยู่กับคุณภาพของถ่านกัมมันต์ (วีรชัย อัจหาญ และคณะ, 2552)

2.2.6 ข้อมูลด้านการตลาดของสินค้าถ่านกัมมันต์ในปัจจุบัน

ถ่านกัมมันต์สามารถนำไปใช้ได้หลายอุตสาหกรรม ทั้งนี้ตัวอย่างของกลุ่มสินค้าที่มีการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นองค์ประกอบหนึ่งของกระบวนการผลิต ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการถ่านกัมมันต์ขยายตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (วีรชัย อัจหาญ และคณะ, 2553) ดังนี้

กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องกรองอากาศ และหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ เนื่องจากสภาวะแวดล้อมของประเทศไทยโดยเฉพาะในเขตชุมชนเมือง ประสบกับปัญหาหมอกควันเป็นพิษ ทำให้มีความต้องการเครื่องกรองอากาศ และหน้ากากป้องกันแก๊สพิษกันมากขึ้น จึงส่งผลต่อเนื่องทำให้มีปริมาณความต้องการถ่านกัมมันต์สูงขึ้นเช่นกัน โดยใช้เป็นตัวดูดซับแก๊สพิษออกไปจากบรรยากาศ

กลุ่มอุตสาหกรรมน้ำดื่ม และน้ำประปา เป็นกลุ่มตลาดที่มีขนาดใหญ่ และมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากเป็นสินค้าที่จำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตประจำวันของผู้คน ขณะเดียวกันน้ำบริสุทธิ์ตามแหล่งน้ำธรรมชาติก็หายากขึ้น ทั้งนี้ถ่านกัมมันต์เป็นปัจจัยสำคัญในการช่วยให้น้ำมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยการดูดซับสิ่งเจือปนต่างๆ ออกไป

กลุ่มโรงงานชุบโลหะ ซึ่งจะมีการระบายน้ำที่ปนเปื้อนไปด้วยโลหะหนักประเภทต่างๆ เช่น โครเมียม นิกเกิล ทองแดง เป็นต้น ออกมาสู่แหล่งน้ำต่างๆ แต่เนื่องด้วยข้อบังคับกฎหมายว่าด้วยเรื่องสิ่งแวดล้อม ทำให้โรงงานชุบโลหะต้องทำการบำบัดน้ำเสียเหล่านั้นก่อนระบายสู่แหล่งน้ำ เป็นเหตุให้มีความต้องการถ่านกัมมันต์ในกระบวนการบำบัดดังกล่าว ในการเป็นตัวดูดซับโลหะหนักที่เจือปนอยู่ในน้ำออกมา

กลุ่มอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารแปรรูป มักมีกลิ่นของวัตถุดิบอาหารที่เหม็นคาว เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ จึงก่อให้เกิดปัญหาด้าน กลิ่นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งจะเป็นลักษณะของกลิ่นเหม็นอับ กลิ่นเหม็นเน่าสารอินทรีย์หรือกลิ่นเหม็นเปรี้ยว เป็นต้น โดยบางครั้งยังเป็นกลิ่น โขยออกไปนอกพื้นที่โรงงานส่งผลให้ชาวบ้านใกล้เคียงได้รับความเดือดร้อน ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่จะมีการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับกลิ่นต่างๆ ให้จางลงไป ซึ่งปัจจุบันในกลุ่มอุตสาหกรรมอาหารมีการขยายตัวค่อนข้างสูง อีกทั้งยังเป็นกลุ่มที่ทำรายได้ และนำเงินตราต่างประเทศเข้ามาเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้รัฐบาลให้การสนับสนุนเป็นอย่างมาก โดยเมื่ออุตสาหกรรมอาหารขยายตัวเพิ่มขึ้น ปริมาณความต้องการถ่านกัมมันต์ก็ย่อมขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

อุตสาหกรรมยา และเครื่องสำอางค์ ในปัจจุบันจะเห็นว่ามีการนำผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับ และดูดซึมพวกแก๊สที่เกิดขึ้นในกระเพาะอาหารหรือตลอดจนดูดซับพวกสารพิษที่เข้าไปในระบบทางเดินอาหารได้ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาถ่านกัมมันต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ และอุตสาหกรรมด้านความงามต่างๆ เช่น โฟมล้างหน้า ยาสระผม สบู่ ต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการดูดซับสิ่งสกปรกของร่างกาย

นอกจากการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ แล้ว ด้วยคุณสมบัติในด้านการดูดกลิ่นได้ดี ทำให้ในปัจจุบันมีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ภายในครัวเรือน โดยใช้ดูดซับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับภายในตู้เย็น ตู้เสื้อผ้า รองเท้า และรถยนต์ โดยมีการบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่สวยงาม และขนาดกะทัดรัดสามารถพกพาไปไหนได้

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์มีกลุ่มตลาดที่กว้างขวางมากไม่จำกัดอยู่ในอุตสาหกรรมใดอุตสาหกรรมหนึ่งเป็นการเฉพาะ ฉะนั้นผู้ผลิตถ่านกัมมันต์จะมีความเสี่ยงด้านพึ่งพาสถานกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งตลาดเดียวต่ำมาก นอกจากนี้ไม่เพียงแต่มีตลาดอยู่เฉพาะภายในประเทศเท่านั้น ปัจจุบันยังสามารถทำการส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศได้อีกด้วย แม้ว่าจะต้องอาศัยการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศเป็นบางส่วน แต่ก็มีแนวโน้มว่าจะสามารถทดแทนการนำเข้าได้มากขึ้น

2.2.7 ข้อมูลผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

จากข้อมูลของกรม โรงงานอุตสาหกรรมมีผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศรายใหญ่จำนวน 5 ราย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลผู้ผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศในปัจจุบัน

ชื่อ	ที่ตั้ง
1. บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด	อำเภอพนสนิม จังหวัดชลบุรี
2. บริษัท กักดีแผ่นดินบ่อวิน จำกัด	อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
3. บริษัท ซีใจแกนติก คาร์บอน	อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา
4. พี เอ คาร์บอน	อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่
5. บริษัท เอ็นจอย แอคทีวี่เต็ด คาร์บอน จำกัด	อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 แก๊สซิฟิเคชัน

จากการศึกษา และทดลองเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการป้อนอากาศ และไอน้ำในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของ Lv et al. (2004) โดยใช้เตาปฏิริยาสูง 1.40 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.00 cm อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 0.30 - 1.00 kg/h ไอน้ำอุณหภูมิ 154 °C โดยการทดสอบระบบเพื่อวิเคราะห์ที่ Steam to Biomass Ratio (S/B) Equivalence Ration (ER) Gas Yield Steam Decomposition Gas Low Heating Value (Gas LHV) และ Carbon Conversion Efficiency ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ER และ S/B ผลการทดสอบระบบที่อุณหภูมิ 700 - 900 °C Gas Yield Carbon Conversion Efficiency และ Steam Decomposition มีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ ยกเว้น Gas Low Heating Value มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 800 °C และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 800 °C ผลการทดสอบการป้อนอากาศ 0.50 0.55 0.60 0.65 และ 0.70 Nm³/h ส่งผลให้ค่า ER มีค่า 0.19 0.21 0.23 0.25 และ 0.27 ตามลำดับ ซึ่งค่า ER แต่ละค่าจะส่งผลกระทบต่อ Gas Yield Carbon Conversion Efficiency Gas Low Heating Value และ Steam Decomposition ซึ่งแต่ละระบบผลิตพลังงานจะมีค่า ER ที่เหมาะสมแตกต่างกัน เช่นเดียวกับกับค่า S/B

Lv et al. (2004) ยังทำการศึกษาค้นคว้าการป้อนไอน้ำต่อวัตถุดิบ ที่อัตรา 0.00 1.35 2.02 2.70 และ 4.04 ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตรา 1.35 ให้ผลผลิตแก๊ส (Gas Yield) ดีที่สุด เท่ากับ 2.39 Nm³/kg ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 0.45 kg/h อุณหภูมิ 800 °C อัตราไหลของอากาศ 0.50 m³/h ค่า ER เท่ากับ 0.22

Hernandez et al. (2012) ทำการศึกษาผลกระทบของไอน้ำที่มีต่อระบบ แก๊สซิฟิเคชัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณไอน้ำในระบบแก๊สซิฟิเคชันสูงขึ้นจะส่งผลให้ CO CO₂ H₂ C₂H₆ และ CH₄ มีค่าสูงขึ้นด้วยแต่มีลักษณะเป็น Non - linear แต่หากมีการเติม N₂ เข้าไปในระบบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น คือ CO₂ จะมีค่าลดลง CO มีค่าลดลงเมื่อปริมาณไอน้ำ 50.00 % ส่วน H₂ C₂H₆ และ CH₄ มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเติม N₂ เข้าในระบบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงมีลักษณะเป็น Non-Linear เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังทำการทดลองหาผลผลิตแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยเปรียบเทียบระหว่างปฏิริยาที่มีการป้อนไอน้ำ และไม่ป้อนไอน้ำ ผลการศึกษาพบว่า ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ไม่มีการป้อนไอน้ำ CO H₂ และ CH₄ มีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ CO₂ และ C₂H₆ มีค่าผกผันกับอุณหภูมิ ส่วนระบบแก๊สซิฟิเคชันที่มีการป้อนไอน้ำ CO CO₂ H₂ และ CH₄ มีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ ยกเว้น C₂H₆ ส่งผลให้ค่าความร้อนของผลผลิตแก๊สที่ผลิตได้มีค่าแปรผันตามด้วย

Rupesh et al. (2014) ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของ H₂ ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่ใช้เชื้อเพลิงกะลามะพร้าว ผลการศึกษาพบว่า แก๊ส H₂ จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่เมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่ง แก๊ส H₂ จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง 527 - 1,527 °C และแก๊ส H₂ จะแปรผัน

ตามค่า ER ที่อุณหภูมิคงที่ เช่นเดียวกับ งานวิจัยของ Lv et al. (2004) ซึ่งแนวโน้มนำการเกิดแก๊ส H_2 มีผลมาจากปฏิกิริยา Water - gas Shift เป็นสำคัญ ในขณะที่อุณหภูมิสูงๆ ปฏิกิริยาสามารถย้อนกลับได้ ตาม Le - Chatelier's Principle ค่า H_2 จึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรือลดลงได้ เหมือนกับปฏิกิริยาการเกิด CH_4 และการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นแก๊ส ก็สามารถย้อนกลับได้ เช่นเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่วน CO ก็เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแต่อัตราการเพิ่มจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิ โดยในการศึกษานี้ ได้กล่าวว่า การเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นแก๊ส ปฏิกิริยาการเกิด CH_4 และปฏิกิริยา ย้อนกลับของ Water Gas Shift มีผลต่อค่าที่เกิดขึ้นจากระบบแก๊สซิฟิเคชัน นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่อการเกิด CO_2 และแก๊ส CH_4

จากการศึกษาการผลิตพลังงานจากขุยมะพร้าวด้วยเทคโนโลยีไอน้ำแก๊สซิฟิเคชันของ Senapati et al. (2012) พบว่า ที่สภาวะการป้อนวัตถุดิบ 40.00 kg/h อัตราป้อนไอน้ำ 12.00 kg/h ไอน้ำ อุณหภูมิสูงสุดของการเดินระบบ 976 - 1,100 °C ระบบสามารถผลิตแก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำเท่ากับ 7.86 MJ/Nm³ และมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส (Cold Gas Efficiency; CGE) เท่ากับ 87.60 %

Kaewpanha et al. (2014) ทำการศึกษาระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันแบบ Fix Bed Reactor ภายใต้ความดันบรรยากาศ ร่วมกับไอน้ำโดยใช้ชีวมวล 3 กลุ่ม ได้แก่ Brown Seaweed Japanese Cedar และ Apple Branch ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น H_2 CO และ CO_2 ก็จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิ

Sharm et al. (2016) ทำการศึกษการผลิตแก๊สชีวมวลด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน แบบ Downdraft โดยการป้อนอากาศร่วมกับไอน้ำ (Equivalence Ration 0.24) พบว่า ถ้าวัตถุดิบมีความชื้นสูงจะส่งผลให้ความต้องการเชื้อเพลิงของระบบลดลงที่อัตราการป้อนอากาศเข้าระบบคงที่ ถ้าความชื้น วัตถุดิบคงที่ แต่อัตราการป้อนอากาศเพิ่มขึ้น ความต้องการเชื้อเพลิงของระบบก็สูงขึ้นเช่นเดียวกัน ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนขึ้นกับตรงต่อปริมาณไอน้ำที่ป้อนใน Reduction Zone การป้อนไอน้ำเข้าไปในระบบแก๊สซิฟิเคชัน จะส่งผลต่ออุณหภูมิในโซน Oxidation และ Reduction ให้ลดลง และส่งผลให้แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ส่วนประสิทธิภาพของเตา อัตราส่วนไอน้ำต่อชีวมวล อัตราส่วนไอน้ำต่ออากาศ มีผลกระทบต่อ อุณหภูมิในแต่ละ โซน และองค์ประกอบอัตราการไหล ค่าความร้อน ประสิทธิภาพ ของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้

Zhai et al. (2015) ทำการศึกษการผลิตแก๊สชีวมวลจากแกลบด้วยระบบไอน้ำแก๊สซิฟิเคชันพบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีอัตราการเกิดถ่านเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และอัตราการป้อนไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่วน H_2 และ CO เพิ่มขึ้น แต่ CO_2 และ CH_4 ลดลงเมื่ออัตราการป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดของวัตถุดิบจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 900 °C

Tangsathitkulchai et al. (2012) ทำการศึกษาปริมาณรุกรานของถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ CO_2 โดยเผาถ่านที่อุณหภูมิ 250 - 750 °C ผลการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ 850 °C เวลา 60 และ 120 min ให้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรุกราน และพื้นที่ผิวสูงสุด

Parthasarathy et al. (2014); Li et al. (2014); Xu et al. (2012) and Moghadam et al. (2014) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด H_2 ของชีวมวลจากกระบวนการไอน้ำแก๊สซิฟิเคชัน ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิด H_2 ในกระบวนการ ได้แก่ ปริมาณไอน้ำที่ป้อน เข้าสู่ระบบ เทคนิคการเดินระบบ ชนิดของชีวมวล ขนาดชีวมวล อุณหภูมิภายใน ปริมาณสัดส่วนไอน้ำต่อชีวมวล ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา และปริมาณการป้อนชีวมวล

2.3.2 ถ่านกัมมันต์

เกศศิริ เหล่าวิชระสุวรรณ (2554) ทำการศึกษาการเตรียม และศึกษาถ่านกัมมันต์จากเปลือก และเมล็ดลิ้นจี่ โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้สารกระตุ้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ ZnCl_2 , H_3PO_4 , H_2SO_4 , KOH , NaOH และ Na_2CO_3 โดยใช้สภาวะในการกระตุ้นเหมือนกัน คือ อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1:1 อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 500 °C และ 2 h ตามลำดับ พบว่า H_3PO_4 ให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรุกรานรวม ขนาดรุกรานเฉลี่ย และค่าการดูดซับไอโอดีน สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารกระตุ้นชนิดอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชาร์พบว่า H_3PO_4 ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรุกรานรวม และขนาดรุกรานเฉลี่ยสูงขึ้น เนื่องจาก H_3PO_4 เป็นสารช่วยยับยั้งการเกิดทาร์ และของเหลวชนิดอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการกระตุ้นซึ่งอาจทำให้เกิดการอุดตันของรุกราน การใช้ H_3PO_4 เป็นสารกระตุ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถนำไปใช้ร่วมกับไอน้ำในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ได้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ ในถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้ยังมีนักวิจัยท่านอื่นๆ ได้ทำการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารเคมี อาทิเช่น Mozammela et al. (2002) ได้ทำการศึกษา การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้ ZnCl_2 เป็นตัวกระตุ้น ในขั้นตอนการศึกษา ใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace) ทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ และใช้ Silica Crucibles เป็นเตาปฏิกิริยา ขนาด 50 mm มีกระบวนการ คือ นำกะลามะพร้าวผสมกับ Zinc Chloride ที่อุณหภูมิห้อง ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 h แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 °C จากนั้นนำไปเผาในเตาอุณหภูมิสูงที่เวลา 10 20 30 40 50 และ 60 min ที่อุณหภูมิ 200 300 400 500 600 และ 700 °C จนครบเวลา ให้ไนโตรเจนเข้าไปในเตาอุณหภูมิสูงเพื่อหยุดปฏิกิริยา นำตัวอย่างถ่านที่เกิดขึ้นมาล้างด้วย HCl และน้ำ แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 °C และนำถ่านที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ผลการวิเคราะห์พบว่า ที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 673.00 $\text{mg I}_2/\text{g}$ ผลผลิตถ่าน 53.00 % ขณะที่อุณหภูมิ 600 °C มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 946.00 $\text{mg I}_2/\text{g}$ ผลผลิตถ่าน 43.00 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดซับไอโอดีนจะแปรผกผันกับผลผลิตถ่านแต่แปรผันตาม

อุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนที่เวลาการทำปฏิกิริยา 50 min มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จากขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีดังกล่าว จะแสดงให้เห็นได้ว่าเป็นกระบวนการที่สลับซับซ้อนหากนำมาขยายใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

จากการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวด้วย NaOH ของ Le et al. (2011) โดยนำวัสดุดิบขนาด 250 - 425 μ เผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 h แล้วนำมาผสมกับสารละลาย NaOH ในอัตราส่วน NaOH : Char เท่ากับ 1 : 1 2 : 1 และ 3 : 1 แล้วนำไปกวน 2 h หลังจากนั้นนำไปทำแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 4 h แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1.5 h นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยสารละลาย HCl และน้ำกลั่นร้อนจนกระทั่งน้ำกลั่นมีค่า pH ประมาณ 6.5 แล้วนำถ่านกัมมันต์มาอบแห้งครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 110 °C ผลการศึกษา พบว่าพื้นที่ผิวปริมาตรรูพรุนรวม และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก มีค่าแปรผันตามปริมาณ NaOH ที่สัดส่วน NaOH : Char เท่ากับ 1 : 1 2 : 1 และ 3 : 1 มีค่า พื้นที่ผิวเท่ากับ 783.00 1,842.00 และ 2.82 m^2/g ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.38 0.93 และ 1.45 cm^3/g ตามลำดับ และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก เท่ากับ 0.38 0.78 และ 1.14 cm^3/g ตามลำดับ

Hu et al. (1999) ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงจากกะลามะพร้าวด้วย KOH ผลการศึกษาพบว่า มีค่า พื้นที่ผิว เท่ากับ 2,451.00 m^2/g ปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 1.21 cm^3/g

Yang et al. (2010) ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงจากกะลามะพร้าวด้วยไมโครเวฟร่วมกับ CO₂ และไอน้ำ โดยนำกะลามะพร้าวเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 2 h แล้วนำถ่าน 25.00 g มากระตุ้นด้วยไมโครเวฟ 2.45 GHz กำลังสูงสุด 3,000 W ที่อุณหภูมิ 900 °C ป้อน CO₂ และไอน้ำเข้าระบบ ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ผิว มีค่า 2,000.00 m^2/g และมีปริมาณผลผลิตถ่านกัมมันต์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยความร้อนวิธีอื่น

Yang et al. (2010) ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงจากกะลามะพร้าวด้วย CO₂ ขั้นตอนเดียว โดยป้อน CO₂ เข้าไปในเตากระตุ้นอุณหภูมิ 900 °C ที่อัตราการไหล 200 cm^3/min เป็นเวลา 140 min ผลการศึกษาพบว่า มีค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ 1,667.00 m^2/g ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก เท่ากับ 0.89 cm^3/g

Kim et al. (1998) ทำการศึกษาการพัฒนาคุณภาพของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมิสด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 800 830 850 880 900 และ 900 °C ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์แปรผกผันกับผลผลิตถ่านกัมมันต์ โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีน และพื้นที่ผิว สูงสุดที่อุณหภูมิ 900 °C เท่ากับ 1,154.00 mgI_2/g และ 1,294.00 m^2/g ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 880 °C ให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์ ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าพื้นที่ผิวสมมูล ดังนั้นจึงทำการทดลองป้อนไอน้ำ 0.00 0.50 1.00 1.50 2.00 2.50 3.00 และ 3.50 g/h พบว่า

จุดสมมูลระหว่างผลผลิตถ่านกัมมันต์กับพื้นที่ผิว ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 1.75 g/h และจุดสมมูลระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนกับพื้นที่ผิวอัตราการป้อนไอน้ำ 1.50 g/h

Le et al. (2008) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผาไหม้ต่อความพรุนของถ่านกะลามะพร้าว โดยเผาที่อุณหภูมิ 400 600 800 และ 1,000 °C เวลา 2 h และนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำ และเผาที่อุณหภูมิ 900 °C ที่เวลา 30 60 90 และ 120 min ผลการศึกษาพบว่า ค่าพื้นที่ผิวมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิการเผาไหม้ และอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นความเป็นถ่านกัมมันต์ และจากการศึกษาการเผาถ่านกะลามะพร้าวที่อุณหภูมิ 1,000 °C เวลา 2 h แล้วนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 120 min ส่งผลให้พื้นที่ผิว ปริมาตรรวม และปริมาตร รูพรุนขนาดเล็กเท่ากับ 1,926.00 m²/g 1.26 cm³/g และ 0.93 cm³/g ตามลำดับ

จากการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวด้วย Supercritical Water ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของ Matsumura et al. (1997) พบว่า ที่อุณหภูมิการเดินระบบสูงสุด 600 °C ความดัน Supercritical Water เท่ากับ 34.5 MPa เวลาการกระตุ้น 0 2 4 และ 6 h ทำให้ถ่านกัมมันต์ มีค่าการดูดซับไอโอดีน 1,050.00 1,280.00 1,350.00 และ 1,360.00 mgI₂/g ตามลำดับ

Maneerung et al. (2016) ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำจากถ่านไม้ชิง กลุ่ม Mesquite ที่ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ถ่านดังกล่าวมีขนาด 0.50 - 1.00 mm มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 177.24 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.12 m³/g เมื่อกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 °C เป็นเวลา 3 h ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 538.98 736.94 และ 776.46 m²/g ตามลำดับ และปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.41 0.65 และ 0.66 m³/g ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นแปรผันตรงกับพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์

Guo et al. (2009) ทำการศึกษาผลกระทบของ CO₂ ต่อโครงสร้างของรูพรุนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ผลการศึกษาพบว่า กะลามะพร้าวที่ผ่านการเตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เวลา 2 h มีพื้นที่ผิว 186.00 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.27 cm³/g แล้วนำมากระตุ้นด้วย CO₂ ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 h อัตราการป้อน CO₂ 600.00 m³/min ค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 1,323.00 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.88 cm³/g

Wei et al. (2006) ทำการศึกษาวิธีการกระตุ้นรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยใช้ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 ให้ความร้อนอุณหภูมิ 450 - 850 °C แบบควบคุมออกซิเจนที่ความดัน 1.10 - 5.30 kPa และขั้นตอนที่ 2 ในความร้อน 850 °C ในสภาวะบรรยากาศ โดยผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนที่ 2 ส่งผลให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น 700.00 m²/g ที่ผลผลิตถ่าน 24 - 28 % เนื่องจากขั้นตอนที่ 2 ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง น้อยกว่า 1 nm

2.3.3 การผลิตถ่านกัมมันต์ร่วมกับแก๊สซิฟิเคชัน

Huo et al. (2014) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของรูพรุนในถ่านที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ (วัตถุดิบ: ถ่านหิน 2 ชนิด และถ่าน ไม้ก๊อก ปีโตรเลียม) ผลการศึกษาพบว่า รูพรุนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และรูพรุนจะมีขนาดเล็กลงเมื่อขนาดของอนุภาคถ่านใหญ่ขึ้น ซึ่งอุณหภูมิภายในเตาของการป้อนไอน้ำมีค่าต่ำกว่าการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากไอน้ำเข้าแพร่กระจายไปในถ่านมากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิของสภาวะเตาที่ป้อนไอน้ำจึงต่ำกว่าสภาวะเตาที่ป้อนคาร์บอนไดออกไซด์

Punsuwan et al. (2015) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ปริมาณการป้อนสารเคมี คุณสมบัติของแก๊ส และรูพรุนของถ่าน โดยใช้แก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำ (300 - 700 °C) ใช้เชื้อเพลิงกะลามะพร้าว ป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ผลการศึกษาพบว่า โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชัน มีความสำคัญต่อปริมาณ และองค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้จากระบบ และยังผลต่อไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งถ้าค่าแก๊สไฮโดรเจนสูงจะมีผลให้ค่าความร้อนของแก๊สที่ผลิตได้สูงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชันยังมีอิทธิพลต่อรูพรุนของถ่านอีกด้วย ในการศึกษางานวิจัยนี้สภาวะที่ดีที่สุด คือ เเผาถ่านที่อุณหภูมิ 450 °C 60 min และนำไปเข้าระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สภาวะที่อุณหภูมิ 600 °C 60 min ใช้สัดส่วนเคมี 4.00 ผลิตแก๊สไฮโดรเจน 27.90 % โดยน้ำหนักแก๊สที่ผลิตได้ทั้งหมด และค่าความร้อน 41.40 MJ/kg และพื้นที่ผิว 2,650.00 m²/g ทั้งนี้ในกรณีที่ไม่ป้อนสารเคมีแต่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 50 % ใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันอย่างเดียว กะลาไม่ผ่านการเผาเป็นถ่านก่อน อุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชัน 600 °C ใช้เวลา 3 h ให้ผลผลิตแก๊ส 26.22 % แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สอื่นๆ เท่ากับ 0.40 16.40 43.97 2.16 และ 37.07 % โดยน้ำหนักแก๊สที่ผลิตได้ทั้งหมดตามลำดับ ค่าความร้อน 3.20 MJ/kg ถ่าน 28.13 % พื้นที่ผิว 119.00 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.07 cm³/g

Chaiprasert et al. (2014) ทำการศึกษาการใช้ निकิล ไดโกลไมท์ในการเปลี่ยนรูปไอน้ำในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ใช้วัตถุดิบกะลามะพร้าว ผลการศึกษาพบว่า निकิล ไดโกลไมท์สามารถทำให้คาร์บอนเพิ่มขึ้น 44.13 - 78.43 % ในขณะที่ทาร์ลดลง 19.55 - 1.40 % ที่อุณหภูมิ 800 °C สัดส่วนไอน้ำต่อถ่าน เท่ากับ 0.95 โดยการใช้ निकิล ไดโกลไมท์ในการเปลี่ยนรูปไอน้ำในระบบแก๊สซิฟิเคชันยังส่งผลให้แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้น แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทนต่ำลง

Matsumura et al. (1997) ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้แก๊สซิฟิเคชันร่วมกับไอน้ำใช้เตาเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.53 mm อัตราการป้อนวัตถุดิบ 1 g/min อุณหภูมิภายในเตา 600 °C ความดันไอน้ำ 34.50 bar เวลากระตุ้น 6 h พบว่า กะลามะพร้าว มีค่าการดูดซับไอ โอซิน

เพิ่มขึ้น 450.00 mgI₂/g (ก่อนกระตุ้น 1,050.00 mgI₂/g) พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จาก 809.00 เป็น 1,011.00 m²/g เนื่องจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ เกิดเป็นรูพรุนใหม่ได้เพิ่มเป็นจำนวนมากทำให้คุณสมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้น

จากข้อมูลปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวมาข้างต้นยังไม่พบการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำในระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการศึกษาผลของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ในระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาดใหญ่ เนื่องจากในกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันในปัจจุบัน จะเกิดถ่านซึ่งเป็นผลพลอยได้ออกมา แต่มีมูลค่าต่ำ จึงมีแนวคิดในการนำถ่านดังกล่าวมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำควบคู่กับการผลิตพลังงานด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ถ่านที่ได้ออกมาจึงเป็นถ่านกัมมันต์พร้อมใช้งาน โดยมีวิธีการศึกษาในบทถัดไป



บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดสอบเดินระบบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการป้อนไอน้ำ สภาวะอัตราการไหลแก๊สของชีวมวลที่เหมาะสม และหาเวลาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ให้มีคุณภาพสูงขึ้น โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ (Prototype Gasification System; PGS) และเมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมแล้วนำสภาวะดังกล่าวไปทดสอบเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ (Commercial Gasification System; CGS) มีรายละเอียด ขั้นตอนการศึกษา ตัวอย่าง อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.2 ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสัญลักษณ์สภาวะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.3 ตัวอย่างและอุปกรณ์

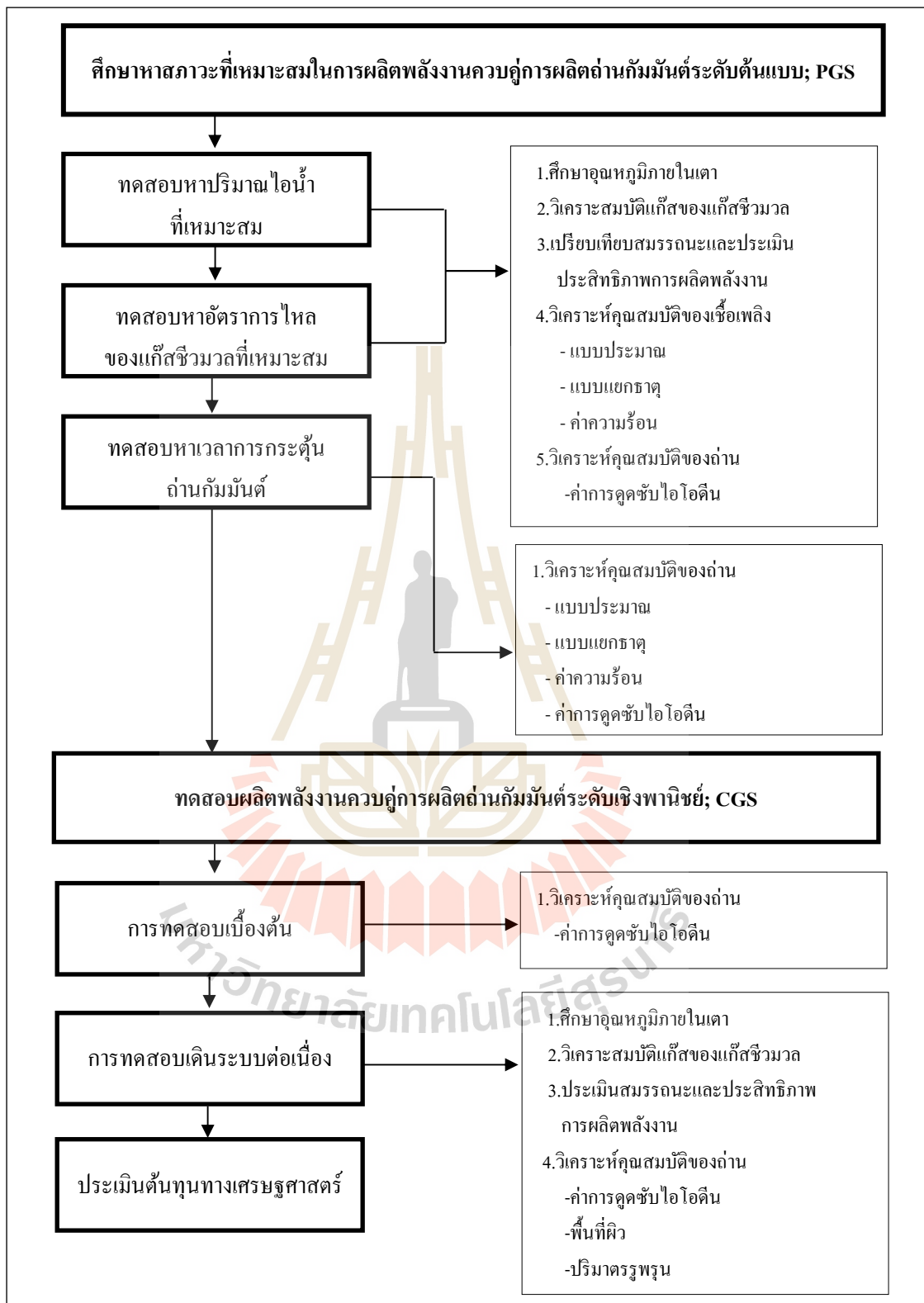
3.3.1 ตัวอย่าง

ตัวอย่างวัตถุดิบกะลามะพร้าวที่ใช้ มีลักษณะเป็นกะลาป่นไขมันมะพร้าวประมาณ 15 % นำมาจากโรงงานแปรรูปมะพร้าวที่ทำการคัดแยกเปลือกออกจากกะลาแล้ว ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60 %wb นำมาผ่านการลดความชื้นให้เหลือประมาณ 12 - 15 %wb โดยวิธีอบแห้งด้วยลมร้อนจากความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าของระบบ แก๊สซิฟิเคชันเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก) โดยลักษณะกะลามะพร้าวที่ผ่านการเตรียมพร้อมใช้งานมีลักษณะ ดังแสดงในรูป ที่ 3.2 ข)

3.3.2 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

3.3.2.1 การเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิง

ทำการเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงกะลามะพร้าวเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ด้วยวิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างของเชื้อเพลิงก่อนใช้ทดลอง ภายหลังจากที่สุ่มเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำไปวิเคราะห์หองค์ประกอบ คุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ ค่าความร้อน และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์สภาวะการทดลอง

สัญลักษณ์	ปริมาณไอน้ำ (bar)	อัตราการไหล ของแก๊สชีวมวล (Nm ³ /h)	เวลาการ กระตุ้นซ้ำ (min)	ตำแหน่ง ป้อนไอน้ำ
ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ; PGS				
PGS_S0.0	0.0	สูงสุด	ไม่กระตุ้น	-
PGS_S0.5	0.5	สูงสุด	ไม่กระตุ้น	เตาผลิตแก๊สชีวมวล
PGS_S1.0	1.0	สูงสุด	ไม่กระตุ้น	เตาผลิตแก๊สชีวมวล
PGS_F180	0.5	180	ไม่กระตุ้น	เตาผลิตแก๊สชีวมวล
PGS_F190	0.5	190	ไม่กระตุ้น	เตาผลิตแก๊สชีวมวล
PGS_F200	0.5	200	ไม่กระตุ้น	เตาผลิตแก๊สชีวมวล
PGS_T30	0.5	สูงสุด	30	เตาผลิตแก๊สชีวมวล/ ห้องผลิตถ่านกัมมันต์
PGS_T60	0.5	สูงสุด	60	เตาผลิตแก๊สชีวมวล/ ห้องผลิตถ่านกัมมันต์
PGS_T120	0.5	สูงสุด	120	เตาผลิตแก๊สชีวมวล/ ห้องผลิตถ่านกัมมันต์
ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์; CGS				
CGS_SR0.0	0.0	สูงสุด	ไม่กระตุ้น	-
CGS_SR0.5	0.5	สูงสุด	ไม่กระตุ้น	เตาผลิตแก๊สชีวมวล
CGS_SR1.0	1.0	สูงสุด	ไม่กระตุ้น	เตาผลิตแก๊สชีวมวล
CGS_SA0.5	0.5	สูงสุด	30	ห้องผลิตถ่านกัมมันต์
CGS_SA1.0	1.0	สูงสุด	30	ห้องผลิตถ่านกัมมันต์

3.3.2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property)

- 1) ขนาด (Size) ของเชื้อเพลิงกะลามะพร้าว คือ ขนาดความยาวของกะลามะพร้าว การหาขนาดใช้วิธีวัดด้วยไม้บรรทัด แล้วบันทึกผลความยาว หาค่าเฉลี่ย
- 2) ความหนาแน่นปกติ (Bulk Density) เป็นความหนาแน่นของกะลามะพร้าวที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั่วไป หาด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักถังตวงเปล่าที่มีปริมาตร 100 L แล้วบรรจุกะลามะพร้าว แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักสุทธิของกะลามะพร้าวแล้วหารด้วยปริมาตรมีหน่วยเป็น kg/m³



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างวัตถุดิบกะลามะพร้าว

3.3.2.3 การศึกษาสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)

1) ความชื้น (Moisture) คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักวัสดุ ความชื้น มีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ และคุณภาพของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ เชื้อเพลิงที่มีขนาด ความชื้นต่ำยิ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบผลิตแก๊สได้มากขึ้นเท่านั้น โดยวิธีการวิเคราะห์ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173 (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก)

2) เถ้า (Ash) คือ ปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในชีวมวล ภายหลังการเผา ซึ่งปริมาณ เถ้าในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ้ามี ปริมาณเถ้าสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนต่ำ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3174 (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก)

3) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คือ ปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ใน ชีวมวล ซึ่งปริมาณสารระเหยในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนสูง เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่เผาไหม้ได้สูง แต่ปริมาณของคาร์บอนคงตัวจะต่ำ ตามลำดับ โดยวิธีการ วิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3175 (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก)

4) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คือ ปริมาณองค์ประกอบ คาร์บอนที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเน องค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ก็มีแนวโน้มที่จะให้

ผลได้ของถ่านชาร์สูง เป็นต้น โดยใช้วิธีการคำนวณจากผลต่างระหว่าง ความชื้น เถ้า และปริมาณ สารระเหย (By Difference) (%db) (รายละเอียดวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก)

5) ค่าความร้อน (Heating Value) คือ ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิง เมื่อเทียบต่อ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg kcal/kg Btu/lb หรือ kcal/L เป็นต้น จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าชีวมวลนั้นๆ มีความเหมาะสมที่จะนำมาแปรรูปเป็น เชื้อเพลิงหรือไม่ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2015

3.3.2.4 การศึกษาสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

การศึกษาองค์ประกอบของปริมาณธาตุในตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์แบบ แยกธาตุ เพื่อหาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHNS Elemental Analyzer) รุ่น Analyzer CHNS-932 EDXRF (เครื่องมือวิเคราะห์นี้มีค่า Limit of Detection 5 ppm) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็น องค์ประกอบของสารอินทรีย์ ส่วนธาตุออกซิเจนใช้วิธีการคำนวณโดยหาจากผลต่างของธาตุ

3.3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

3.3.3.1 ระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับ ต้นแบบ และระดับเชิงพาณิชย์ เป็นเทคโนโลยี Biomass Gasification ชนิด Open Top Downdraft Gasification ที่ใช้หลักการเผาไหม้ที่ควบคุมปริมาณอากาศ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดย เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นของแข็ง จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สที่มีองค์ประกอบ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สมีเทน (CH₄) สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมัน ปิโตรเลียม หรือแก๊สธรรมชาติได้ โดยแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทำความสะอาด อย่างเหนียวและฝุ่น และลดอุณหภูมิแล้ว จะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สันดาป ภายในที่เป็นต้นกำลังผลิตไฟฟ้าได้ มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1) ระบบเตาผลิตแก๊สชีวมวล 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส และ 3) ระบบผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และคุณลักษณะดังแสดง ในตารางที่ 3.2

3.3.3.2 ชุดกระตุ้นถ่านกัมมันต์

ชุดกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเทคโนโลยีไพโรไลซิส มี หลักการทำงาน คือ ชุดกระตุ้นถ่านนี้จะมีช่องรับถ่านที่เชื่อมต่อกับช่องถ่านออกของระบบ แก๊สซิฟิเคชัน ถ่านที่ออกจากระบบแก๊สซิฟิเคชันจะถูกส่งมายังช่องรับถ่านของชุดกระตุ้นถ่านแล้ว ถูกลำเลียงเข้าห้องถ่านกัมมันต์ด้วยสกรู ระบบจะให้ความร้อนห้องถ่านกัมมันต์ด้วยหัวเผาที่ใช้ แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยระบบจะปรับอุณหภูมิอัตโนมัติตามที่ผู้เดินระบบ ตั้งค่าไว้ เมื่อถ่านถูกลำเลียงเข้าห้องถ่านกัมมันต์เรียบร้อยแล้ว ปิดสกรูลำเลียง และเปิดไอน้ำเข้าห้อง

ถ่านกัมมันต์ ระบบจะเริ่มกระตุ้นถ่าน รอกจนครบเวลาการกระตุ้นแล้วปิดไอน้ำ และเปิดมอเตอร์ขับ สกรูลำเลียงถ่านกัมมันต์ออกจากระบบ ซึ่งระบบกระตุ้นนี้ใช้การควบคุมแบบ Manual โดยลักษณะ และแผนผังของชุดกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 - 3.5

3.3.3.3 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ

อุปกรณ์ และพารามิเตอร์ต่างๆ ในการศึกษา นี้ แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และ รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 และตำแหน่งการวัด แสดงไว้ในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.2 ความสามารถในการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	รายการ	ต้นแบบ	เชิงพาณิชย์
1	ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)	100	250
2	อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (kg/hr)	63	200
3	อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล (Nm ³ /h)	226	500
4	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)	82	74

ตารางที่ 3.3 การวัดพารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์		เครื่องมือวัด
	PGS	CGS	
1. อุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีวมวล (°C)	T1_PGS- T6_PGS	T1_CGS- T4_CGS	Thermocouple Type-K
2. อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล (Nm ³ /h)	V _g (PGS)	V _g (CGS)	Gas flow Meter (Range 5 to 40 m/s: Vane Probes)
3. องค์ประกอบแก๊สชีวมวล (%V/V)	G _c (PSG)	G _c (CGS)	Online Potable Gas Analyzer Gasboard-3100P Series
4. น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)	m _{bio} (PGS)	m _{bio} (CGS)	Scale
5. น้ำหนักถ่าน (kg)	m _{ash} (PGS)	m _{ash} (CGS)	Scale
6. ความดันไอน้ำ (bar)	P (PGS)	P (CGS)	Pressure Gauge
7. อัตราการไหลของไอน้ำ (kg/h)	Q (PGS)	Q (CGS)	Steam Flow Meter
8. อุณหภูมิไอน้ำ (°C)	TS (PGS)	TS (CGS)	Steam Flow Meter



ก.ระดับต้นแบบ ; PGS



ข.ระดับเชิงพาณิชย์ ; CGS



ค.ระบบเตาผลิตแก๊สชีววมวล



ง.ระบบทำความสะอาดแก๊ส



จ.ระบบผลิตไฟฟ้า



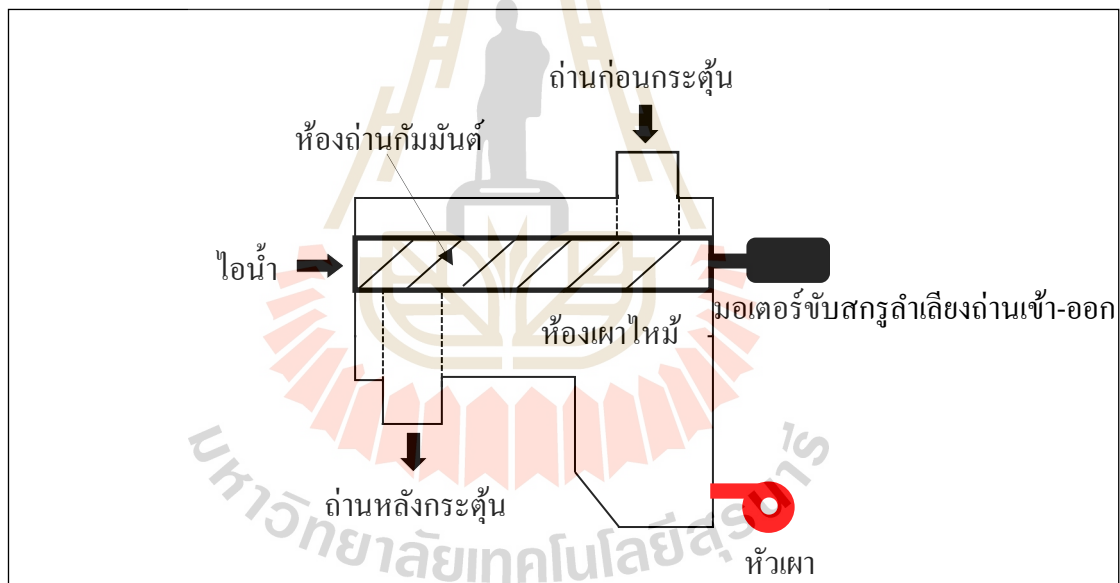
รูปที่ 3.3 ระบบแก๊สชีวภาพที่ใช้งานวิจัยนี้



ก.ระดับต้นแบบ; PGS

ข.ระดับเชิงพาณิชย์; CGS

รูปที่ 3.4 ชุดกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.5 แผนผังชุดกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



ก. Thermocouple Type-K



ข. Gas flow Meter



ค. Potable Gas Analyzer



ง. Scale

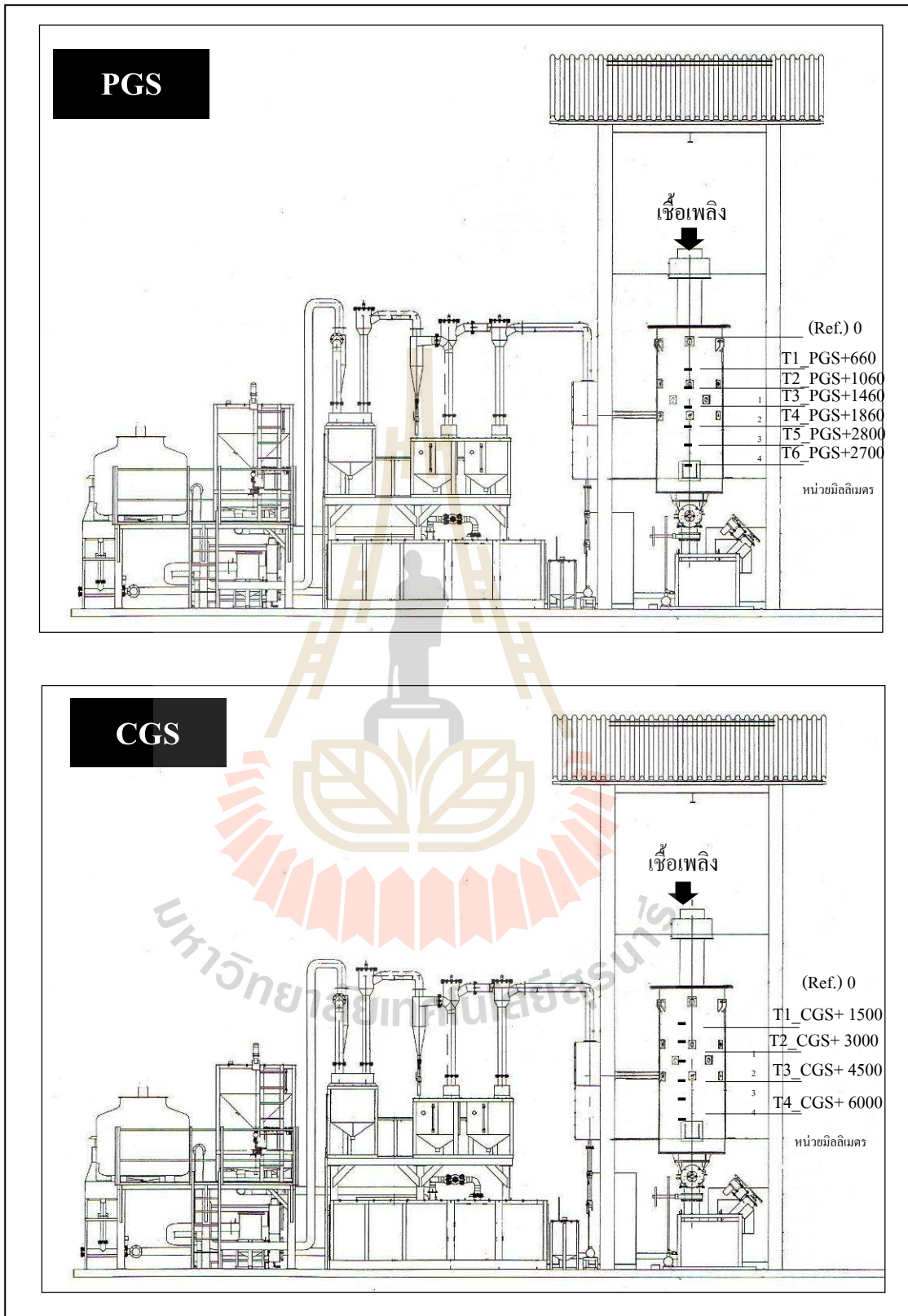


จ. Pressure Gauge



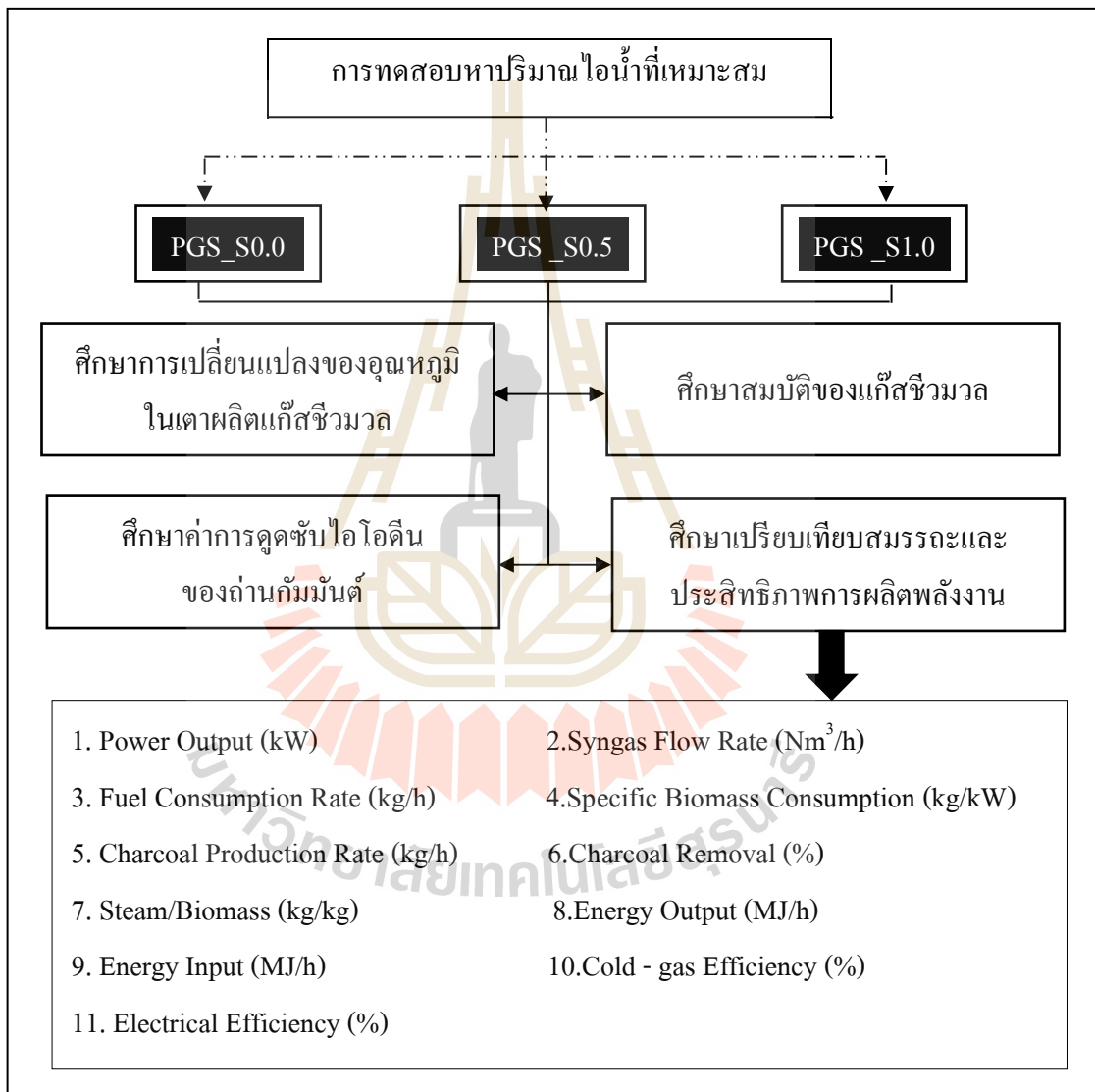
ฉ. Steam Flow Meter

รูปที่ 3.6 เครื่องมือวัด



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล

สมบัติของแก๊สชีววมวล ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เปรียบเทียบสมรรถนะ และ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน แล้วพิจารณาคัดเลือกสถานะที่เหมาะสม โดยเลือกสถานะที่ถ่านให้ค่า การดูดซับไอโอดีนสูงสุด และกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเช่นเดียวกัน โดยคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ เพิ่มขึ้นนั้นต้องไม่ส่งผลให้กำลังการผลิตไฟฟ้าลดลง มีขั้นตอนการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.9 และ รายละเอียดการศึกษาในหัวข้อต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสม

3.4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล

ข้อมูลของอุณหภูมิในเตาจะแสดงผลทางระบบ Data Logger ซึ่งสามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้ตลอดเวลา (ในที่นี้จะเก็บทุกๆ 30 min) ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จำนวน 6 ตำแหน่ง (T1_PGS - T6_PGS) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Temperature Profile) จะสามารถนำไปใช้อธิบายความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (เครื่องมือวัด และตำแหน่งการวัด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 - 3.7)

3.4.1.2 สมบัติของแก๊สชีวมวล

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ในแต่ละการทดลอง โดยทำการเก็บตัวอย่างแก๊สที่ผ่านระบบทำความสะอาดแล้ว โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงแบบออนไลน์ (Gasboard - 31000P Series, China) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สต่าง คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (เครื่องมือวัด และตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.8)

3.4.1.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

เป็นค่าสำคัญที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากไอโอดีนถูกถ่านดูดซับได้ดี ดังนั้นค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่าน โดยวัดเป็น mg (ของไอโอดีน) / น้ำหนักถ่าน 1 g โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94 (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก)

3.4.1.4 กำลังการผลิตไฟฟ้า (Power Output)

เก็บข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าโดยจดบันทึกจากหน้าจอแสดงผลของระบบเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ซึ่งทำการจดบันทึกทุก 10 min แล้วหาค่าเฉลี่ยไฟฟ้าโดยค่าที่แสดงออกมามีหน่วยเป็น kW

3.4.1.5 อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล (Flow Rate of Syngas)

การเก็บข้อมูลอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในแต่ละสภาวะ จะใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Model DIG-SID O-O, Nippon Flow Cell, Japan) โดยข้อมูลจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Online Measuring System โดยมีอัตราการเก็บข้อมูล 30 วินาที/ครั้ง ทั้งนี้เพื่อการ Monitoring ระบบ และป้องกันไม่ให้เกิดการคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ที่กำหนดไว้ (เครื่องมือวัด และตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.8)

3.4.1.6 อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption Rate)

เก็บข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกเติมใส่ลงไปในเตาปฏิกรณ์โดยใช้ตาชั่ง ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาคำนวณ ซึ่งจะได้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในหน่วย kg/h (เครื่องมือวัด และตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.8)

3.4.1.7 อัตราการเกิดถ่าน (Charcoal Production Rate)

ข้อมูลอัตราการเกิดถ่านจะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของถ่านที่ถูกนำออกจากเตาผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้ตาชั่ง ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาคำนวณ ซึ่งจะได้อัตราการการเกิดถ่านในหน่วย kg/h (เครื่องมือวัด และตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.8)

3.4.1.8 อัตราการไหลของไอน้ำ (Steam Flow Rate)

เก็บข้อมูลอัตราการไหลของไอน้ำด้วย Steam Flow Meter (SPIRAX SARCO Stream Flow Meter TVA) ซึ่งวัดอัตราการไหลของไอน้ำทุกๆ 10 s แล้วส่งข้อมูลเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ (เครื่องมือวัด และตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.8)

3.4.1.9 ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold - gas Efficiency; η_{cg}) มีวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อ ประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล โดยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ โดยใช้ความสัมพันธ์ คือ (Arjharn et al., 2012; 2013)

$$\text{Cold - gas Efficiency} = \frac{\text{Rate of Energy Carried by Syngas}}{\text{Rate of Energy Supplied to Reactor}}$$

$$\eta_{cg} = \frac{V_g \times CV_g}{m_{bio} \times LHV_{bio}} \quad (3.1)$$

เมื่อ

V_g	คือ	Flow Rate of Syngas (Nm^3/h)
CV_g	คือ	Calorific Value of Syngas (MJ/m^3)
m_{bio}	คือ	Fuel Consumption (kg/h)
LHV_{bio}	คือ	Low Heating Value of Fuel (MJ/kg)

3.4.1.10 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ

ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ (Operation Performance) ที่คำนวณได้จากข้อมูลของสภาวะการทดลองต่างๆ มีสมการการคำนวณ ดังต่อไปนี้

อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Biomass Consumption)

$$\text{Specific Biomass Consumption} = \frac{\text{Fuel Consumption Rate}}{\text{Power Output}} \quad (3.2)$$

เปอร์เซ็นต์การดึงถ่าน (Charcoal Removal)

$$\text{Charcoal Removal} = \frac{\text{Charcoal Production Rate}}{\text{Fuel Consumption Rate}} \times 100 \quad (3.3)$$

อัตราส่วนไอน้ำต่อชีวมวล (Steam/Biomass; S/B)

$$S/B = \frac{\text{Steam Flow Rate}}{\text{Fuel Consumption Rate}} \quad (3.4)$$

พลังงานจากเชื้อเพลิงเข้าระบบ (Energy Input)

$$\text{Energy Input} = \text{LHV}_{\text{bio}} \times m_{\text{bio}} \quad (3.5)$$

เมื่อ

LHV_{bio}	คือ	Low Heating Value of Fuel (MJ/kg)
m_{bio}	คือ	Fuel Consumption (kg/h)

พลังงานจากแก๊สชีววมวลออกกระบบ (Energy Output)

$$\text{Energy Output} = CV_g \times V_g \quad (3.6)$$

เมื่อ

V_g	คือ	Flow Rate of Syngas (Nm^3/h)
CV_g	คือ	Calorific Value of Syngas (MJ/m^3)

3.4.1.11 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency)

การหาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าใช้ความสัมพันธ์ (Arjham et al, 2012)

ดังนี้

$$\text{Electrical Efficiency } (\eta_{el}) = \frac{\text{Energy equivalent of Electrical Power}}{\text{Rate of Energy Supplied to Reactor}}$$

$$\eta_{el} = \frac{3.6 \times P_e}{m_{bio} \times \text{LHV}_{bio}} \quad (3.7)$$

เมื่อ

P_e	คือ	Electrical Power (kW)
m_{bio}	คือ	Fuel Consumption (kg/h)
LHV_{bio}	คือ	Low Heating Value of Fuel (MJ/kg)

3.4.2 การทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม

ในขั้นตอนการศึกษานี้ใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ โดยแบ่งสภาวะการศึกษากออกเป็น 3 สภาวะ โดยแต่ละสภาวะเดินระบบโดยใช้สภาวะการป้อนไอน้ำที่เหมาะสม ในหัวข้อ 3.4.1 มีสภาวะการศึกษาดังนี้ สภาวะที่ 1 อัตราการไหลของแก๊สชีววมวล $180 \text{ Nm}^3/\text{h}$ สัญลักษณ์ PGS_F180 สภาวะที่ 2 อัตราการไหลของแก๊สชีววมวล $190 \text{ Nm}^3/\text{h}$ สัญลักษณ์ PGS_F190 สภาวะที่ 3 อัตราการไหลของแก๊สชีววมวล $200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ สัญลักษณ์ PGS_F200 แล้วทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวล สมบัติของแก๊สชีววมวล ค่าการดูด

ดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เปรียบเทียบสมรรถนะ และประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน แล้วพิจารณาคัดเลือกสถานะที่เหมาะสม โดยเลือกสถานะที่ถ่านให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด และกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด โดยคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นนั้นต้องไม่ส่งผลให้กำลังการผลิตไฟฟ้าลดลง มีรายละเอียดการศึกษาเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.4.1.1 - 3.4.1.11 และขั้นตอนการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.9

3.4.3 การทดสอบหาเวลาการกระตุ้น

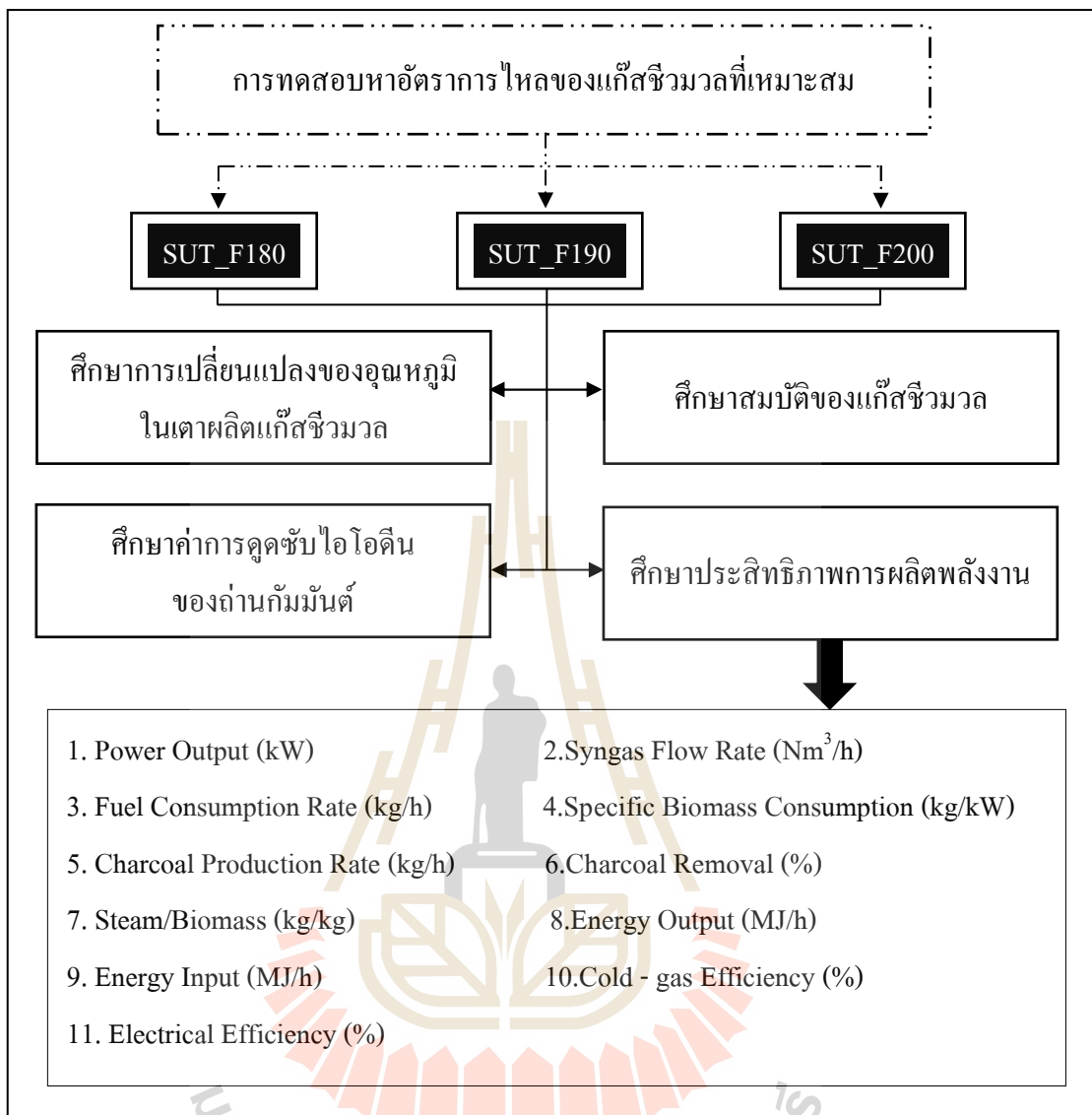
ในขั้นตอนการศึกษานี้ใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 100 kW ผลิตพลังงาน และกระตุ้นถ่านเป็นถ่านกัมมันต์ในสถานะ PSG_F200 โดยใช้สถานะเดินระบบ การป้อนไอน้ำ และอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ในหัวข้อ 3.4.1 และ 3.4.2 แล้วนำถ่านที่ได้จากการกระตุ้นในสถานะ PSG_F200 ไปกระตุ้นซ้ำในห้องผลิตถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิ 550 °C ใช้ไอน้ำในการกระตุ้น โดยป้อนไอน้ำที่ความดัน 0.5 bar อัตราการไหล 12 kg/h แล้วทำการกระตุ้นโดยแบ่งสถานะการศึกษาก่อเป็น 3 สถานะ ตามเวลาการกระตุ้น ดังนี้ สถานะที่ 1 ที่เวลาการกระตุ้น 30 min สัญลักษณ์ PGS_T30 สถานะที่ 2 ที่เวลาการกระตุ้น 60 min สัญลักษณ์ PGS_T60 สถานะที่ 3 ที่เวลาการกระตุ้น 120 min สัญลักษณ์ PGS_T120 แล้วทำการศึกษาคูสมบัติของถ่านกัมมันต์เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการกระตุ้นซ้ำ มีขั้นตอนการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.10 และรายละเอียดของการศึกษาคูสมบัติของถ่านกัมมันต์ ด้านคูสมบัติทางกายภาพ (หัวข้อ 3.3.2.2) องค์ประกอบแบบประมาณ ค่าความร้อน (หัวข้อ 3.3.2.3) องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (หัวข้อ 3.3.2.4) และค่าการดูดซับไอโอดีน (หัวข้อ 3.4.1.3)

3.4.4 การผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ระดับเชิงพาณิชย์

3.4.4.1 ทดสอบเบื้องต้น

โดยเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สสูงสุด เพื่อหาค่าการดูดซับไอโอดีน (หัวข้อ 3.4.1.3) และเลือกสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อเนื่อง โดยใช้ข้อมูลการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมเป็นปริมาณไอน้ำอ้างอิงจากผลการศึกษาผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ โดยกำหนดสถานะการเดินระบบ 5 สถานะ คือ สถานะที่ 1 ไม่ป้อนไอน้ำ สัญลักษณ์ CGS_SR0.0 สถานะที่ 2 - 3 ป้อนไอน้ำเข้าสู่เตาผลิตแก๊สชีวมวล ความดัน 0.5 และ 1.0 bar ที่อัตราการไหลของไอน้ำ 40 และ 60 kg/h ตามลำดับ สัญลักษณ์ CGS_SR0.5 และ CGS_SR1.0 ตามลำดับ และสถานะที่ 4 - 5 ป้อนไอน้ำเข้าสู่ห้องผลิตถ่านกัมมันต์ ความดัน 0.5 และ 1.0 bar ที่อัตราการไหลของไอน้ำ 40 และ 60 kg/h ตามลำดับ สัญลักษณ์ CGS_SA0.5 และ CGS_SA1.0 ตามลำดับ โดยใช้เวลากระตุ้น 30 min



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทดสอบหาอัตราการผลิตของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม

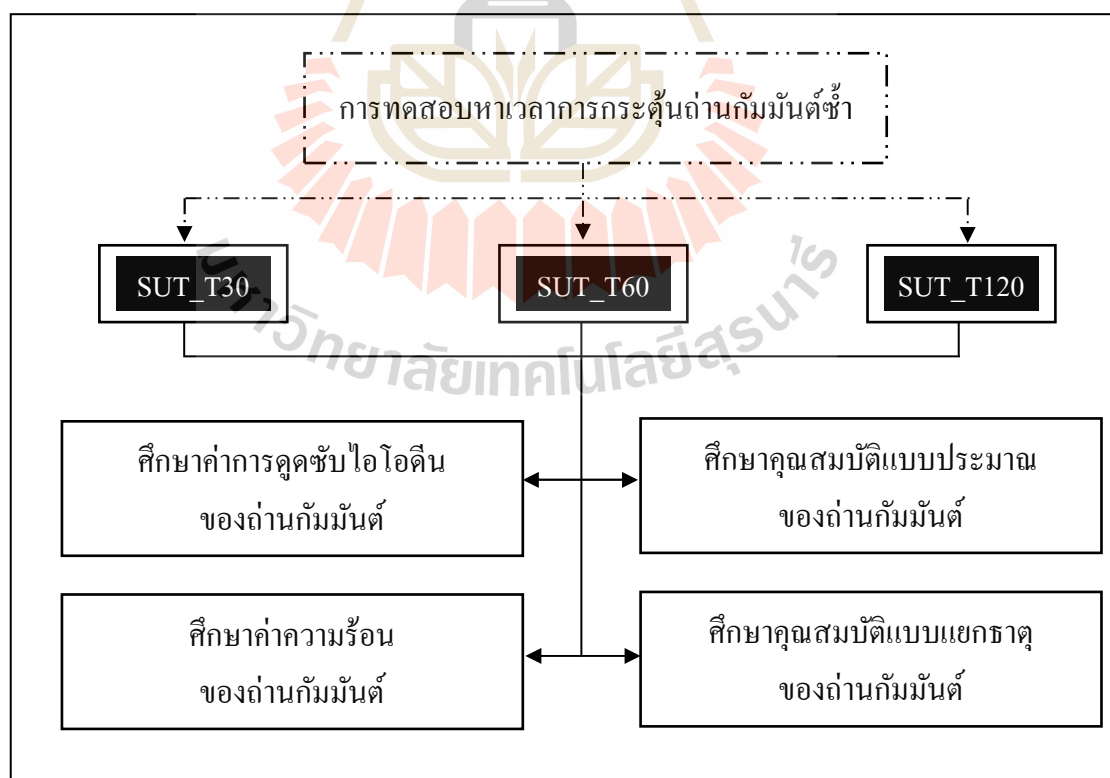
3.4.4.2 การเดินระบบต่อเนื่อง

ทดสอบเดินระบบต่อเนื่อง 80 h เพื่อเก็บข้อมูลการผลิตพลังงานและข้อมูลถ่านกัมมันต์ มีขั้นตอนการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.12 และรายละเอียดการศึกษาด้านพลังงาน เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4.1.1 - 3.4.1.11 ส่วนการศึกษาคูสมบัตินี้ของถ่านกัมมันต์ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.2 - 3.3.2.4 และ 3.4.1.3 นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเดินระบบต่อเนื่องเพิ่ม โดยนำถ่านกัมมันต์ดังกล่าวไปวิเคราะห์รูพรุนด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 °C โดยใช้เครื่องมือ Accelerated Surface Area and Porosimetry สมบัติ

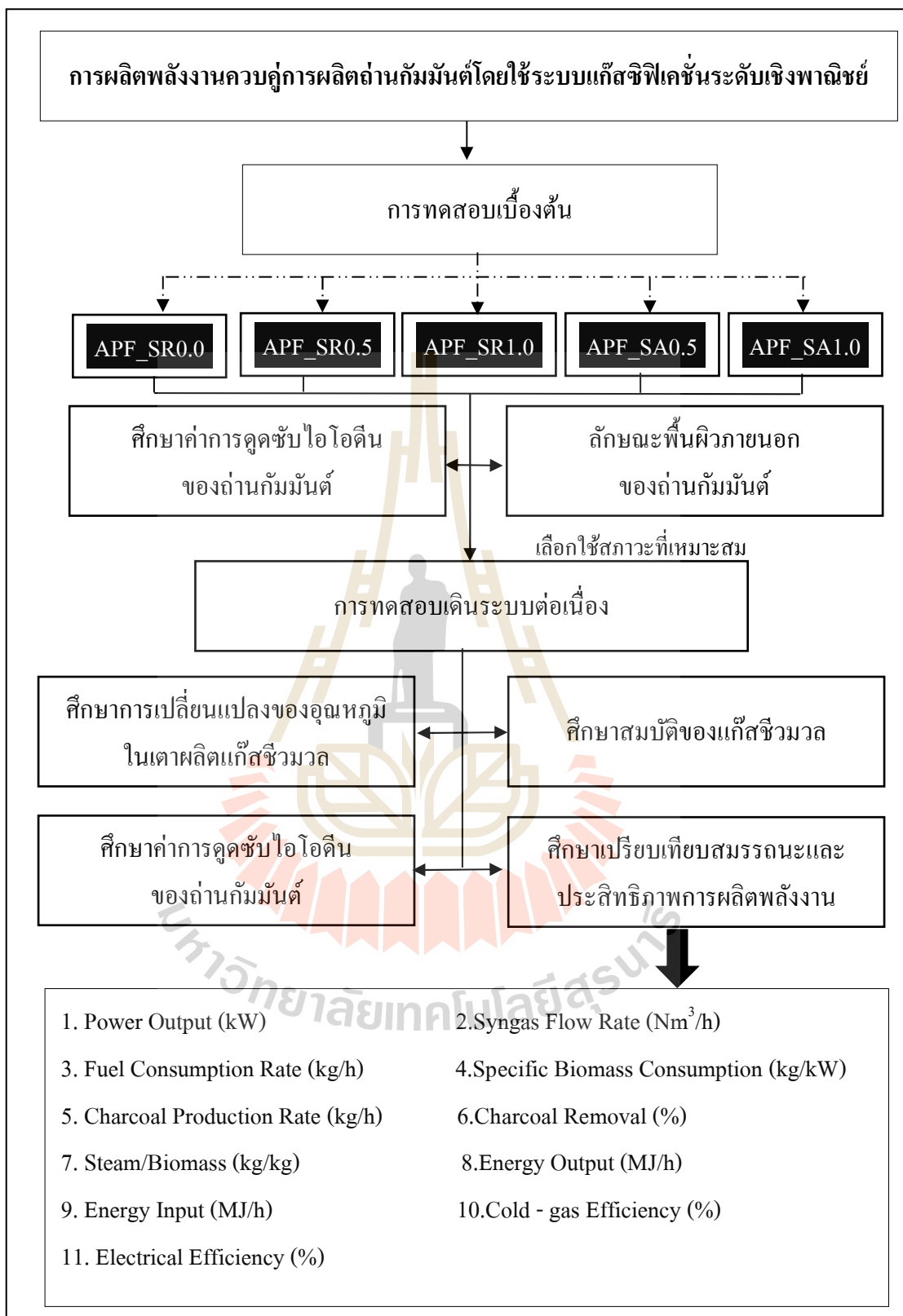
ความพรุนที่พิจารณา คือ พื้นที่ผิว (Surface Area) ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore Volume) (ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก มีรัศมีรูพรุนเฉลี่ยน้อยกว่า 2 nm ใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊ส และไอระเหย) ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ (Mesopore and Macropore Volume) (ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง มีรัศมีรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 2 - 50 nm ใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี และปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ มีรัศมีรูพรุนเฉลี่ยมากกว่า 50 nm ซึ่งปรกติจะไม่มีที่เหมาะสมนำไปใช้เป็นสารดูดซับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total Pore Volume) ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Width) และลักษณะพื้นผิวนอกของถ่าน ซึ่งการศึกษา ลักษณะพื้นผิวนอกของถ่าน ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

3.4.4.3 การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิต ถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์นั้น จะทำการศึกษาศรษฐศาสตร์อย่างง่าย ในด้าน รายได้ต่อปี ค่าใช้จ่ายต่อปี และผลตอบแทน



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทดสอบหาเวลาการกระตุ้นซ้ำ



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้แสดงผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผลการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบกะลามะพร้าว ผลการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ (Prototype Gasification System; PGS) ได้แก่ ผลการทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสม ผลการทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม และสรุปสถานะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ และผลการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ (Comercial Gasification System; CGS) ได้แก่ ผลการทดสอบเบื้องต้น ผลการเดินระบบต่อเนื่อง และผลการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ การผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ มีรายละเอียดดังนี้

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบกะลามะพร้าว

ตัวอย่างหรือวัตถุดิบกะลามะพร้าว ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลังงานควบคู่ถ่านกัมมันต์ ในงานวิจัยนี้ นำมาจากโรงงานแปรรูปมะพร้าวที่ทำการคัดแยกเปลือกออกจากกะลาแล้ว โดยในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณค่าความร้อน และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ ของวัตถุดิบกะลามะพร้าวโดย มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

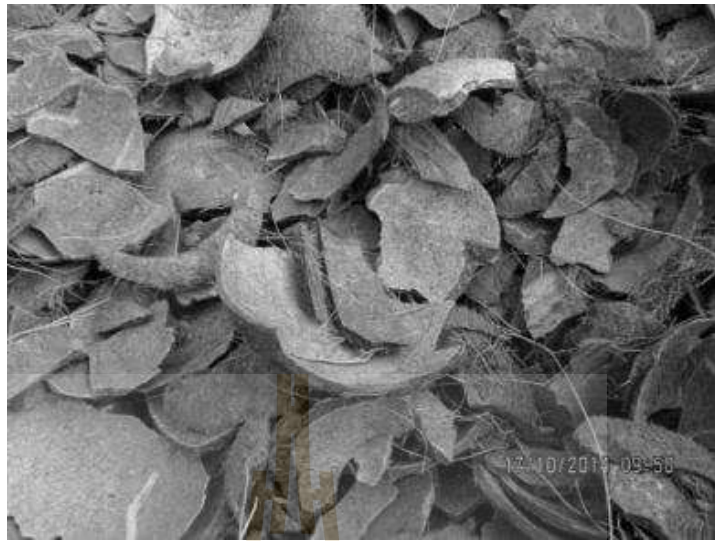
4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ลักษณะของกะลามะพร้าวที่ใช้มีใบมะพร้าวปนน้อยกว่า 15 % ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เนื่องจากหากมีใบมะพร้าวปนมากกว่าสัดส่วนนี้ จะทำให้การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นในลักษณะของการวาบไฟ เพราะเชื้อเพลิงใบมะพร้าวมีช่องว่างของอากาศมากเวลาในการลุกไหม้ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (วีรัชย์ อัจหาญ และคณะ, 2552) และเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นในเตาผลิตแก๊สชีววมวล เนื่องจากในระบบมีแก๊สออกซิเจนสูง เมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลมีค่าต่ำ

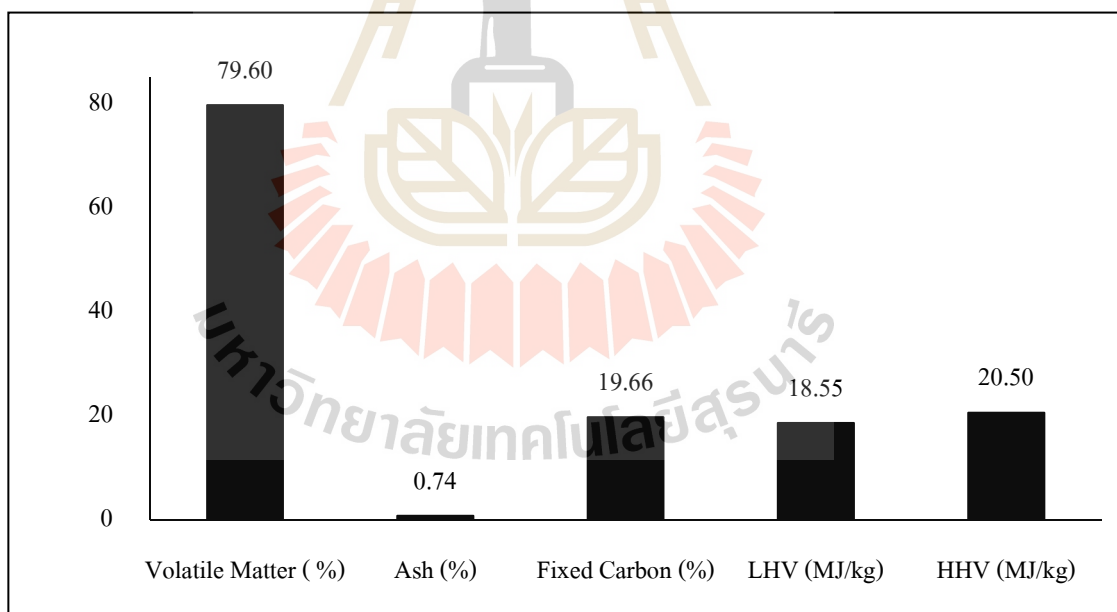
วัตถุดิบกะลามะพร้าวที่ใช้มีขนาด 8 - 25 cm ความหนาแน่น 250 kg/m³ ความชื้น 12.81 % จากค่าคุณสมบัติทางกายภาพดังกล่าวมีความเหมาะสมกับการนำไปเป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน ตามงานวิจัยของ วิรัชย์ อัจหาญ และคณะ (2551) ที่ทำการศึกษาและทดลองแล้วพบว่า ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่สามารถเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่ากับ 118 - 453 kg/m³ และความชื้นของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน คือ ความชื้นไม่เกิน 15 % โดยที่ขนาดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลขนาดใหญ่หรือเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตา และจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวมวลมีค่าต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กหรือเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูง ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้น และแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น ส่วนความชื้นมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ และคุณภาพของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ โดยเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำจะส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สมีประสิทธิภาพสูง (วิรัชย์ อัจหาญ และคณะ, 2551)

4.2.2 องค์ประกอบแบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อน

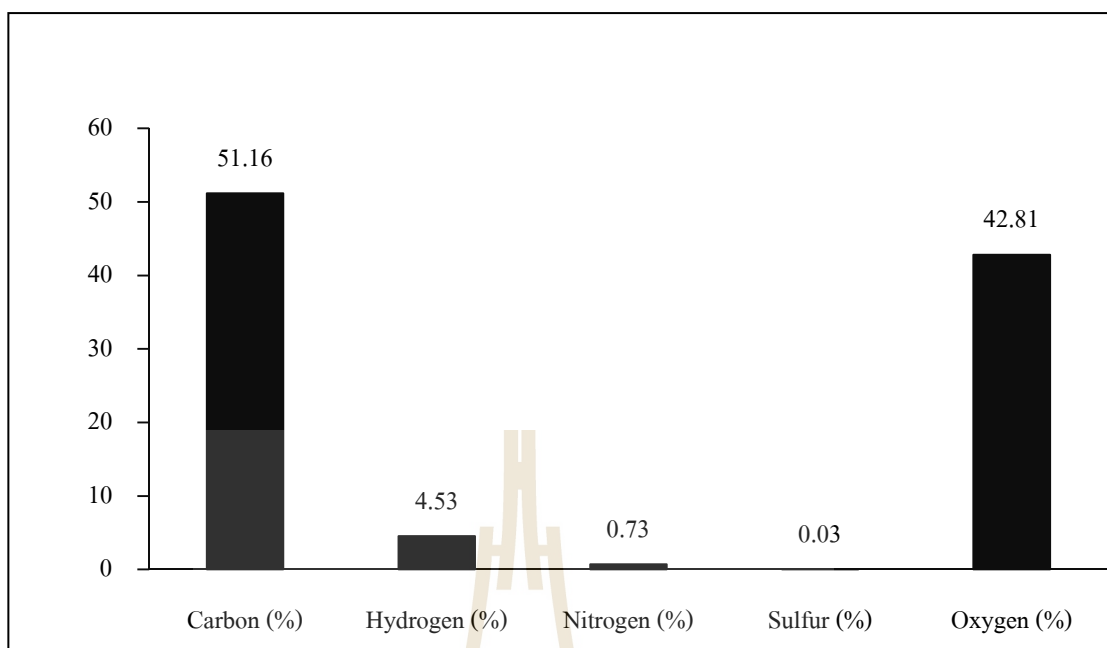
ในการวิเคราะห์คุณสมบัติองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อน (Heating Value) ของวัตถุดิบกะลามะพร้าวพบว่า วัตถุดิบกะลามะพร้าวมีค่าสารระเหยสูง คาร์บอนคงตัวสูง คาร์บอนสูง และถ้าต่ำ วัตถุดิบกะลามะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงเป็นถ่านตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ดี (Punsuwan et al., 2015) ส่วนซัลเฟอร์และไนโตรเจนของวัตถุดิบกะลามะพร้าวมีค่าต่ำ ซึ่งจะส่งผลดีให้การปล่อยมลพิษ NO_x และ SO_x ในระหว่างกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันต่ำด้วย และค่าความร้อนมีค่าสูง จะส่งผลให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานสูง เนื่องจากค่าความร้อนแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่สะสมอยู่ในชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 4.2 - 4.3



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบกะลามะพร้าว



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบแบบประมาณ และค่าความร้อนของวัตถุดิบกะลามะพร้าว



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของวัตถุบิกะลาอะพร้าว

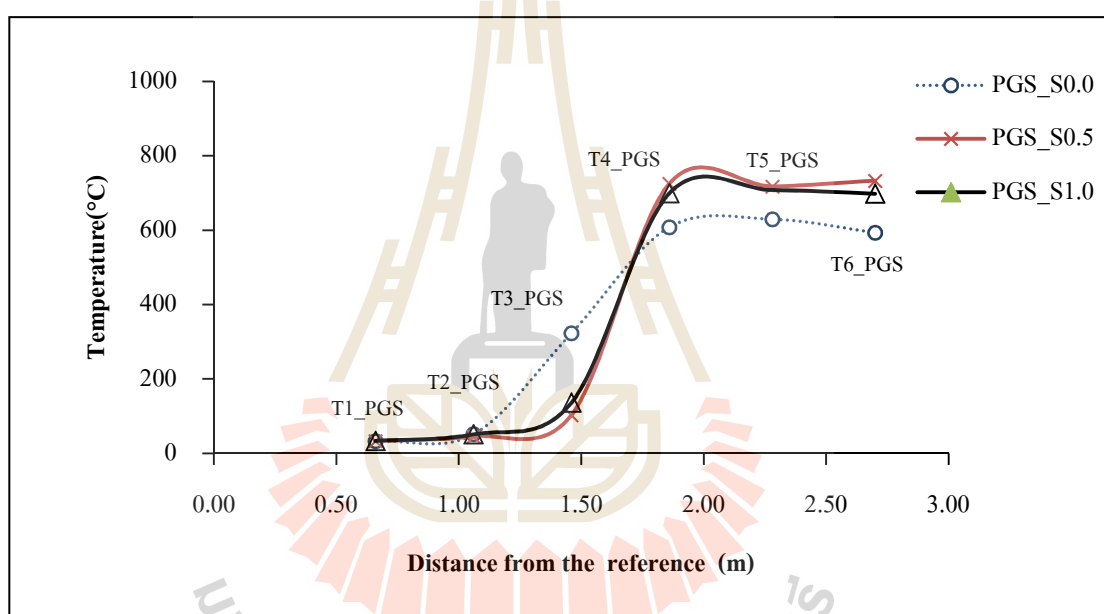
4.3 ผลการทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ

จากผลการศึกษาหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม 3 สภาวะ ได้แก่ PGS_S0.0 PGS_S0.5 และ PGS_S1.0 ที่อัตราการไหลของแก๊สชีววมวลสูงสุด และระบบมีเสถียรภาพในการผลิตพลังงาน มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีววมวล

ในสภาวะการป้อนไอน้ำเข้าสู่เตาผลิตแก๊สชีววมวล PGS_S0.5 และ PGS_S1.0 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยตั้งแต่ T1_PGS - T6_PGS ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลุกไหม้ของเชื้อเพลิงค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิในตำแหน่งที่ระยะความสูง T1_PGS - T3_PGS มีค่าต่ำอยู่ระหว่าง 100 - 200 °C การถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ไอน้ำในวัตถุบิกะลาจะระเหยออกในช่วงอุณหภูมินี้ จากนั้นอุณหภูมิจึงเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะความสูง T4_PGS - T6_PGS ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 600 - 700 °C โดยการลุกไหม้ที่เกิดขึ้นทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอน และไฮโดรเจนหลุดออก และไปเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาอุณหเคมี เกิดเป็นแก๊สชีววมวล ตามสมการในทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน และเมื่อพิจารณา PGS_S0.5 และ

PGS_S1.0 เทียบกับ PGS_S0.0 พบว่า ตำแหน่งที่ระยะความสูง T4_PGS - T6_PGS อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นประมาณ 12 - 20 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณไอน้ำมีผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวลให้ มีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแก๊สชีวมวล โดยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีปริมาณลดลง (Chaiprasert et al., 2009; Tursun et al., 2016; Kaewpanha et al., 2014; Punsuwan et al., 2015; Andrea Kruse., 2009 and Gokon et al., 2015) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตายังมีผลต่อคุณสมบัติของถ่าน ให้มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น (Mozammel, et al., 2002)



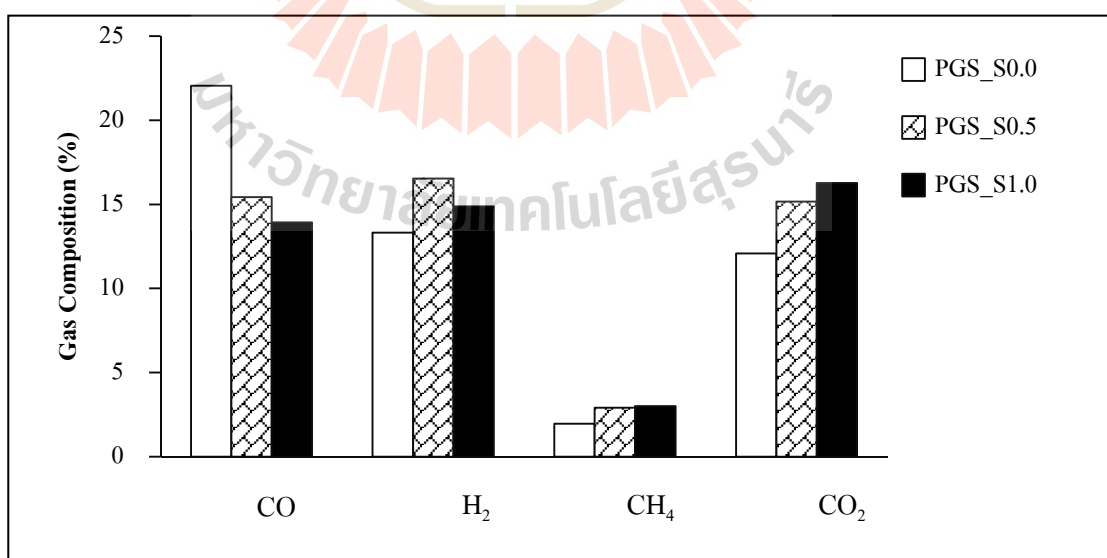
รูปที่ 4.4 ลักษณะอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล ณ ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ (T1_PGS - T6_PGS) ที่สภาวะการป้อนไอน้ำความดัน 0.0 0.5 และ 1.0 bar

4.3.2 สมบัติของแก๊สชีวมวล

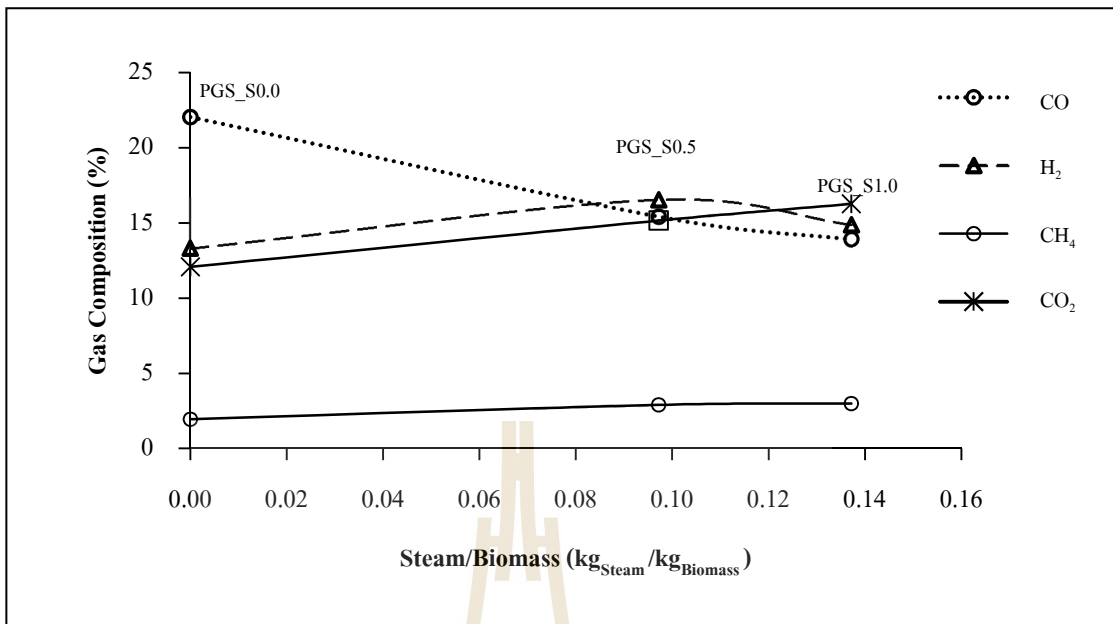
จากผลการศึกษาคูณสมบัติของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จากทดสอบหาสภาวะการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ 3 สภาวะ ได้แก่ PGS_S0.0 PGS_S0.5 และ PGS_S1.0 พบว่า CO มีค่าสูงสุดเท่ากับ 22.05 % ที่ PGS_S0.0 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เนื่องจากไอน้ำไปทำปฏิกิริยา Water Gas Shift กับ CO เกิดเป็น CO_2 และ H_2 ปริมาณ CO จึงมีค่าลดลง ปฏิกิริยาดังกล่าวส่งผลให้

CO₂ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 16.27 % ที่ PGS_S1.0 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น (Sharma et al., 2016) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.6

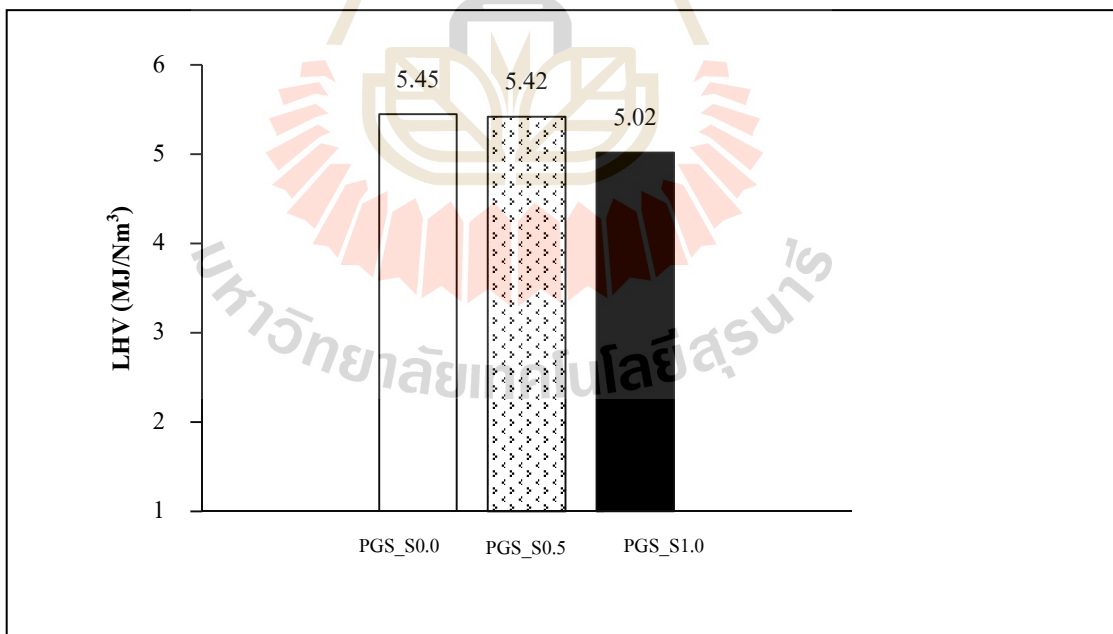
H₂ มีสูงสุดเท่ากับ 16.54 % ที่ PGS_S0.5 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก PGS_S0.0 24.17 % เนื่องจากไอน้ำที่ป้อนเข้าระบบนั้นจะไปทำปฏิกิริยา Steam - carbon กับคาร์บอน (C) เกิดเป็น H₂ ปริมาณ H₂ ในแก๊สชีววมวลจึงมีค่าสูงขึ้น และ H₂ มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงสูงกว่า 0.1 kg_{steam}/kg_{biomass} เนื่องจากป้อนไอน้ำมากเกินไปไอน้ำจะไปทำปฏิกิริยากับ C ดังนั้นไอน้ำจะไปทำปฏิกิริยา Water Gas Shift กับ CO เกิดเป็น CO₂ และ H₂ จากนั้น H₂ จะไปทำปฏิกิริยา Methanation กับ CO เกิดเป็น CH₄ และ H₂O ค่า H₂ ที่เป็นสมบัติของแก๊สชีววมวลจึงมีค่าลดลง (Kaewpanha et al., 2014) และส่งผลให้ CH₄ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.99 % ที่ PGS_S1.0 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก PGS_S0.0 53.33 % ดังแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.6 จากการเปลี่ยนแปลงของ CO H₂ CH₄ และ CO₂ เมื่อมีการป้อนไอน้ำเข้าระบบส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวล PGS_S0.5 และ PGS_S1.0 มีค่าลดลง 0.55 และ 7.38 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ PGS_0.0 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 - 4.8 เนื่องจากไอน้ำเกิด Steam Reforming ไปทำปฏิกิริยากับ Hydrocarbon (CO และ CH₄) ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง เกิดเป็น CO₂ เพิ่มขึ้น ความร้อนของแก๊สชีววมวลจึงมีค่าลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Gai et al., (2016) ที่ทำการศึกษาค่าการเพิ่มขึ้นของ H₂ ด้วยระบบไอน้ำแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าที่สัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิง 2.0 kg_{steam}/kg_{biomass} ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลมีค่าลดลงเช่นกัน



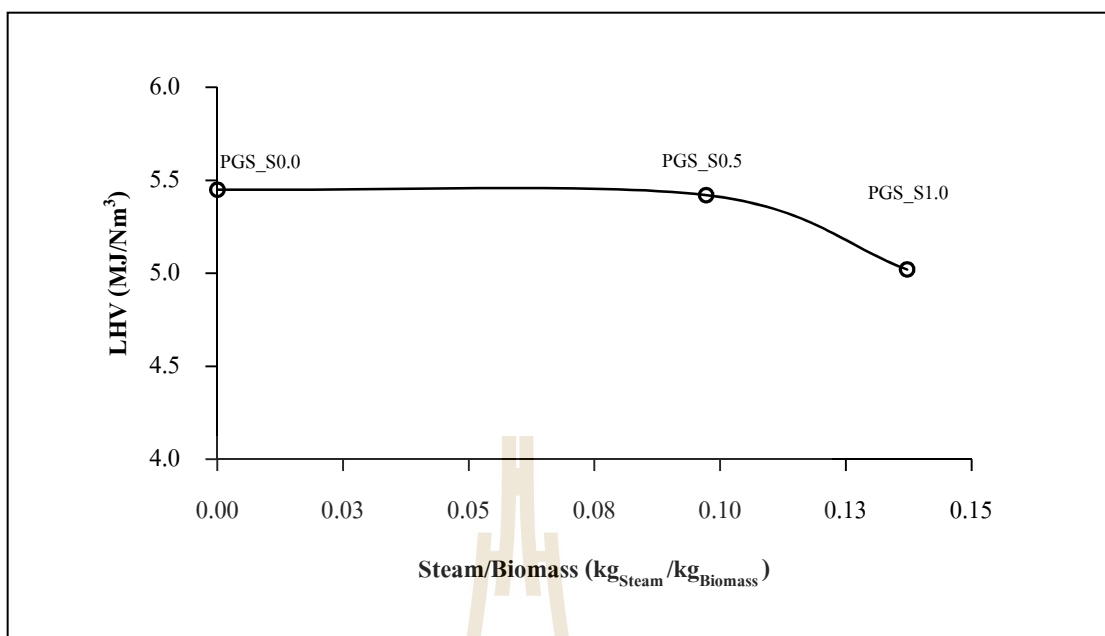
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของปริมาณไอน้ำที่ความดันต่างๆ ต่อค่าองค์ประกอบของแก๊สชีววมวล



รูปที่ 4.6 ผลของสัดส่วนไอน้ำต่อชีวมวล (Steam/Biomass) กับองค์ประกอบของแก๊สชีวมวล



รูปที่ 4.7 ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล กรณีทดสอบหาสภาวะการป้อนไอน้ำที่เหมาะสม



รูปที่ 4.8 ผลของสัดส่วนไอน้ำต่อชีวมวล (Steam/Biomass) กับค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล

4.3.3 สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบการผลิตพลังงาน

ผลการศึกษาประสิทธิภาพ และสมรรถนะของระบบผลิตพลังงานควบคู่ถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบที่สภาวะ PGS_S0.0 PGS_S0.5 และ PGS_S1.0 พบว่า PGS_S0.5 ให้กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 65.50 kW เพิ่มขึ้น 6.30 % เมื่อเทียบกับ PGS_S0.0 และ PGS_S1.0 ลดลง 0.68 % เมื่อเทียบกับ PGS_S0.0 เป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในเตา และปริมาณไอน้ำที่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบของแก๊สชีวมวลตั้งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่งผลให้พลังงานที่เตาผลิตแก๊สชีวมวลผลิตได้ของ PGS_S0.5 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,043.35 MJ/h ดังนั้น PGS_S0.5 จึงมีกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ก) และ 4.9 ข)

จากการเดินระบบที่กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของ PGS_S0.0 PGS_S0.5 และ PGS_S1.0 พบว่า อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ข) เนื่องปริมาณการป้อนไอน้ำส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลมีค่าลดลง เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าจึงมีความต้องการแก๊สชีวมวลเพิ่มมากขึ้นอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลจึงสูงขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล จะส่งผลให้อัตราการใช้เชื้อเพลิง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Sharma et al., 2016) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ค) และ 4.9 ง) และอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ช) และ 4.9 ซ)

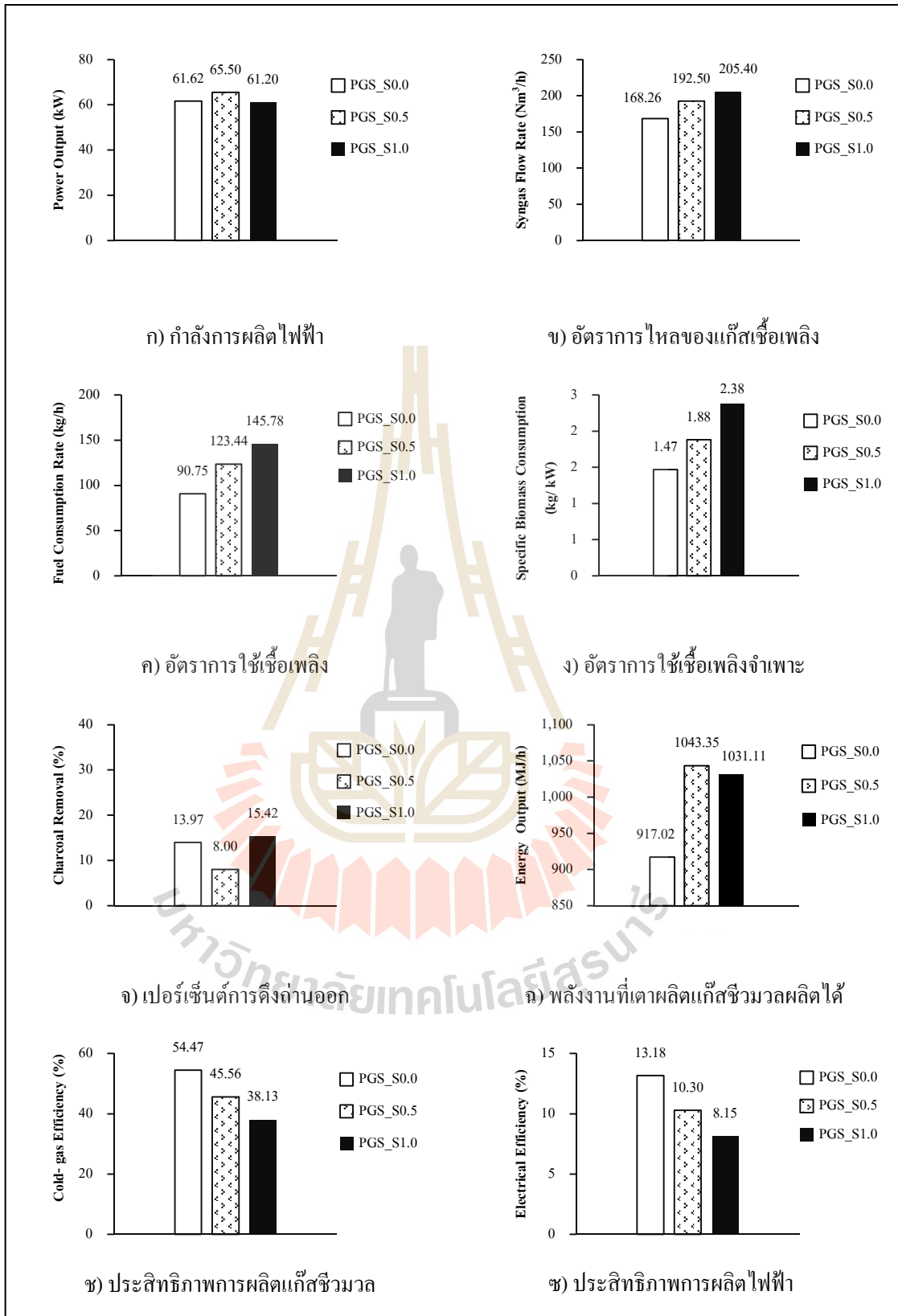
แต่อย่างไรก็ดีการป้อนไอน้ำที่ PGS_S0.5 นั้นไม่ทำให้ระบบผลิตพลังงานหรือกำลังการผลิตไฟฟ้ามีค่าลดลง ดังนั้น PGS_S0.5 จึงเป็นสถานะที่มีความเหมาะสมในการผลิตพลังงาน

4.3.4 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

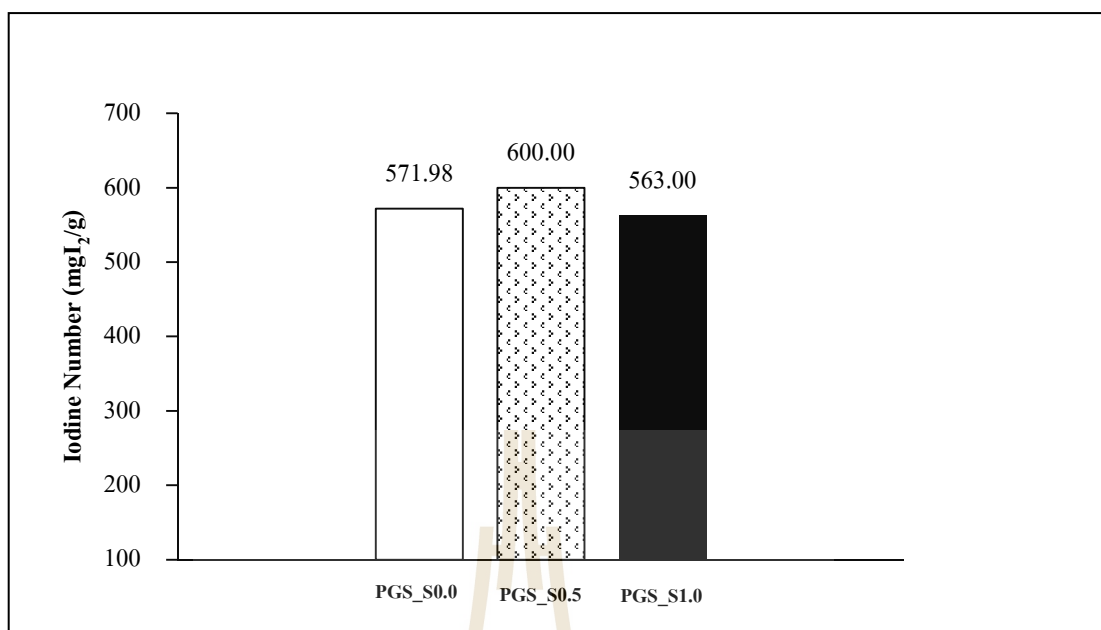
นอกจากพลังงานหรือไฟฟ้าที่ระบบแก๊สซิฟิเคชันผลิตได้แล้ว ยังมีถ่านที่เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากกระบวนการผลิตพลังงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไอน้ำร่วมกับระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อกระตุ้นถ่านให้มีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีมูลค่าสูง เพราะถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การดูดซับสี การดูดซับกลิ่น ดูดซับแก๊สหรือใช้กับงานบำบัดน้ำเสีย โดยจากการป้อนไอน้ำที่สถานะต่างๆ จะส่งผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่ใช้ในการพิจารณาเกรดของถ่านกัมมันต์ จากการศึกษาพบว่า PGS_S0.5 ถ่านมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 600.00 mgI₂/g เพิ่มขึ้น 4.90 % เมื่อเทียบกับ PGS_S0.0 แต่ PGS_S1.0 ถ่านมีค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่า PGS_S0.0 ประมาณ 1.57 % เนื่องจากปริมาณการป้อนไอน้ำมีผลกระทบต่อค่าการดูดซับไอโอดีน หากป้อนในปริมาณสูงเกินไปจะส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนถูกทำลาย ค่าการดูดซับไอโอดีนจะลดต่ำลง (Kim et al., 1998) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 นอกจากนี้ปริมาณการป้อนไอน้ำยังมีปัจจัยด้านอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาการกระตุ้น (Mozammela et al., 2002) ซึ่งจะแสดงผลการศึกษาในหัวข้อถัดไป

4.3.5 สรุปปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบที่สถานะป้อนไอน้ำความดัน 0.0 0.5 และ 1.0 bar โดยพิจารณาความเหมาะสมจาก กำลังการผลิตไฟฟ้า และค่าการดูดซับไอโอดีน สรุปว่าสถานะการป้อนไอน้ำความดัน 0.5 bar PGS_S0.5 มีความเหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่กับถ่านกัมมันต์ โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 65.50 kW ที่อัตราการของแก๊ส 192.50 Nm³/h อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 1.88 kg/kW สัดส่วนการป้อนไอน้ำ 0.10 kg_{Steam}/kg_{Biomass} อัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ 9.87 kg/h ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวมวล 45.56 % ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 10.30 % และถ่านมีค่าการดูดซับไอโอดีน 600.00 mgI₂/g ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ วีรัชย์ อาหาญ และคณะ (2551)



รูปที่ 4.9 สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน กรณีทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสม



รูปที่ 4.10 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ กรณีทดสอบหาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสม

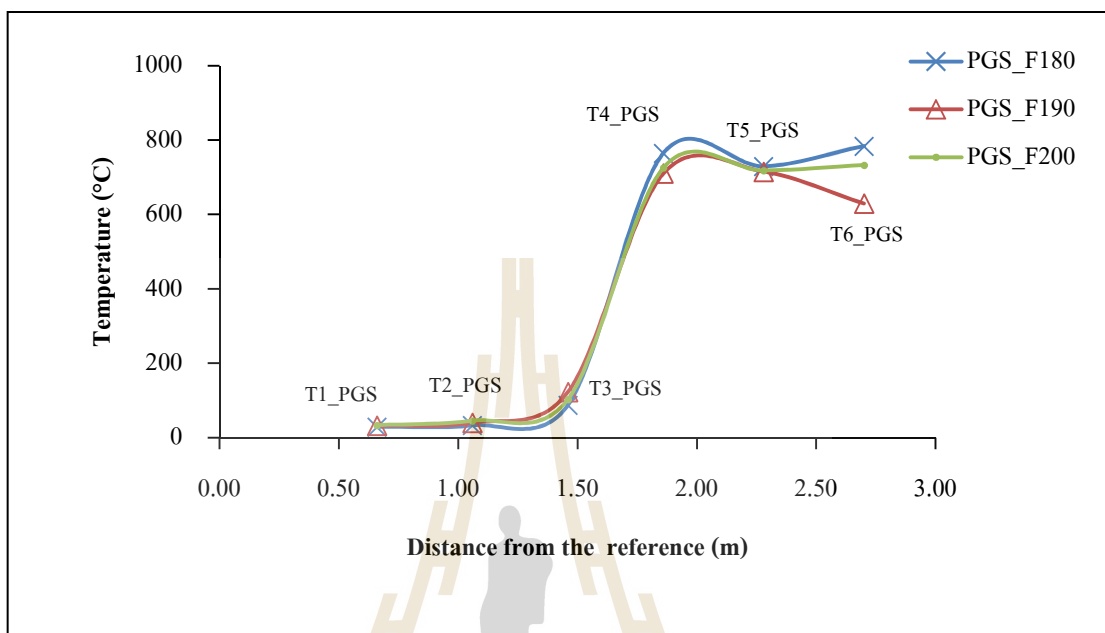
4.4 ผลการทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ

จากผลการศึกษาหาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม 3 สภาวะ ได้แก่ PGS_F180 PGS_F190 และ PGS_F200 ที่ปริมาณการป้อนไอน้ำ 0.5 bar มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีววมวล

จากข้อมูลผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ย T1_PGS - T6_PGS ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 สภาวะ มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิในตำแหน่งที่ระยะความสูง T1_PGS - T3_PGS มีค่าต่ำ คือ ไม่เกิน 100 - 200 °C การถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เป็นช่วงของการระเหยความชื้น และไฟโลไลซิส จากนั้นอุณหภูมิจึงเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะความสูง T4_PGS - T5_PGS ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 600 - 800 °C โดยการลุกไหม้ที่เกิดขึ้น จะทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ ในที่นี้ คือ คาร์บอน และไฮโดรเจน หลุดออก และจะถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้น ในปฏิกิริยาอุณหภูมิเพื่อเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ คือ แก๊สชีววมวล และระยะความสูง T6_PGS อุณหภูมิ PGS_F190 มีค่าต่ำกว่า PGS_F180 และ PGS_F200 ประมาณ

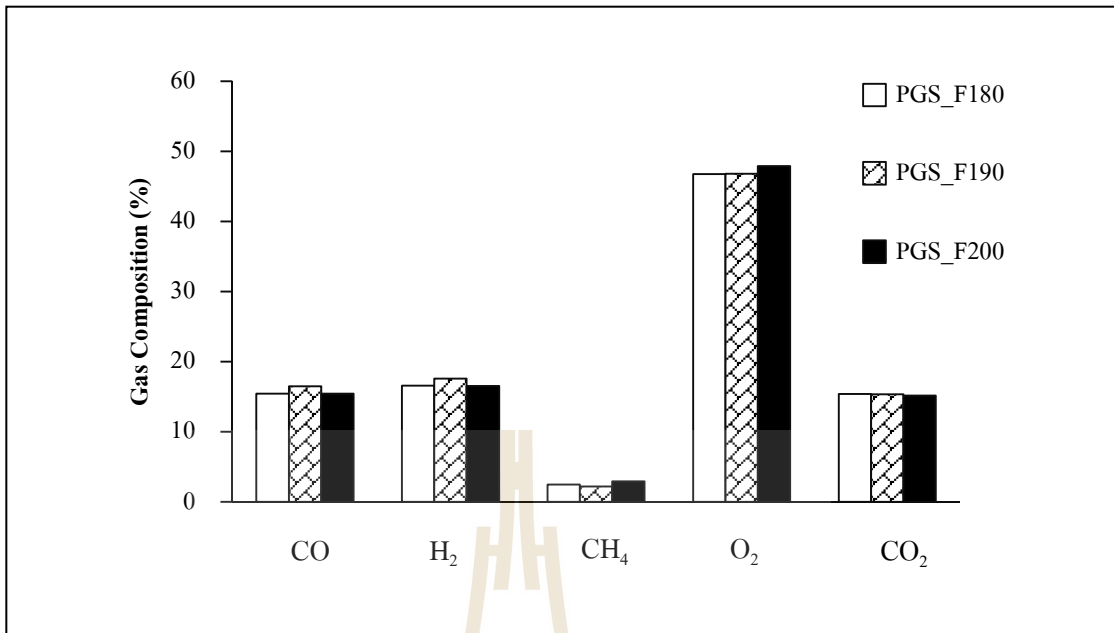
14 - 20 % ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าลดลง เนื่องจากการรับอนุภาคออกจากถ่านลดลง
รูปทรงจึงลดค่าการดูดซับไอโอดีนจึงมีค่าลดลง (Wei et al., 2002) ดังแสดงในรูปที่ 4.15



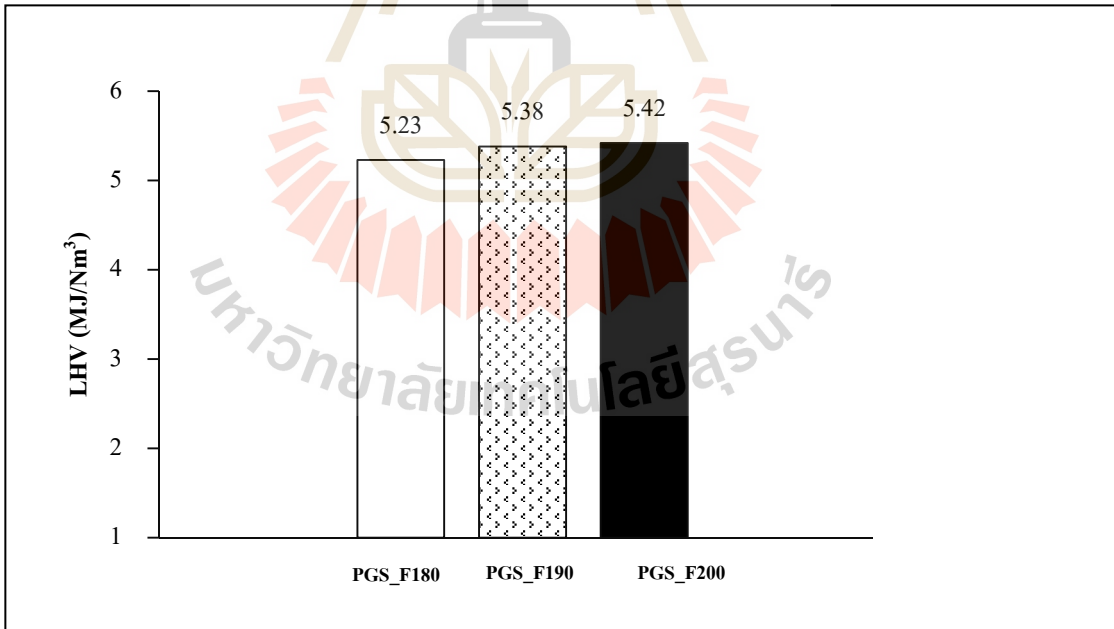
รูปที่ 4.11 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีวมวล
กรณีทดสอบหาอัตราการผลิตของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสม

4.4.2 สมบัติของแก๊สชีวมวล

จากผลการศึกษาคุณสมบัติของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จากทดสอบอัตราการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคุมการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ 3 สภาวะ ได้แก่ PGS_F180 PGS_F190 และ PGS_F200 พบว่า CO และ H₂ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 16.47 % และ 16.54 % ตามลำดับ ที่ PGS_F190 และมีใกล้เคียงกับ PGS_F180 และ PGS_F200 เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตามีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ CO₂ และ CH₄ มีค่า 15.34 % และ 2.19 % ตามลำดับ ซึ่งมีใกล้เคียงกับ PGS_F180 และ PGS_F200 ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความร้อนสูงสุดที่ PGS_F200 เท่ากับ 5.42 MJ/kg ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วีรัชย์ อางหาญ และคณะ (2554) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 - 4.13



รูปที่ 4.12 สมบัติของแก๊สชีววมวล กรณีทดสอบหาอัตราการผลิตของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม



รูปที่ 4.13 ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวล กรณีทดสอบหาอัตราการผลิตของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม

4.4.3 สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

ผลการศึกษาประสิทธิภาพ และสมรรถนะของระบบผลิตพลังงานควบคู่ถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบที่สภาวะ PGS_F180 PGS_F190 และ PGS_F200 พบว่า PGS_F200 ให้กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 65.50 kW เนื่องจาก PGS_F200 มีอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลสูงสุดเท่ากับ 192.50 Nm³/h ส่งผลให้พลังงานที่เตาผลิตแก๊สชีวมวลผลิตได้ของ PGS_F200 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,043.35 MJ/h ดังนั้น PGS_F200 จึงมีกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ก) 4.14 ข) และ 4.14 จ) อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่มีค่าสูง จะส่งผลให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงเช่นกัน (Sharma et al., 2016) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ค) แต่อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ เปอร์เซ็นต์การคั่งถ่านมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จ) อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะจึงมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่มีค่าสูงขึ้น และอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลนั้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สชีวมวลเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ดีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้านั้นยังคงสูงขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วีรัชย์ อาจหาญ และคณะ (2551) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ข) ดังนั้น PGS_F200 จึงเป็นสภาวะที่มีความเหมาะสมในการผลิตพลังงาน

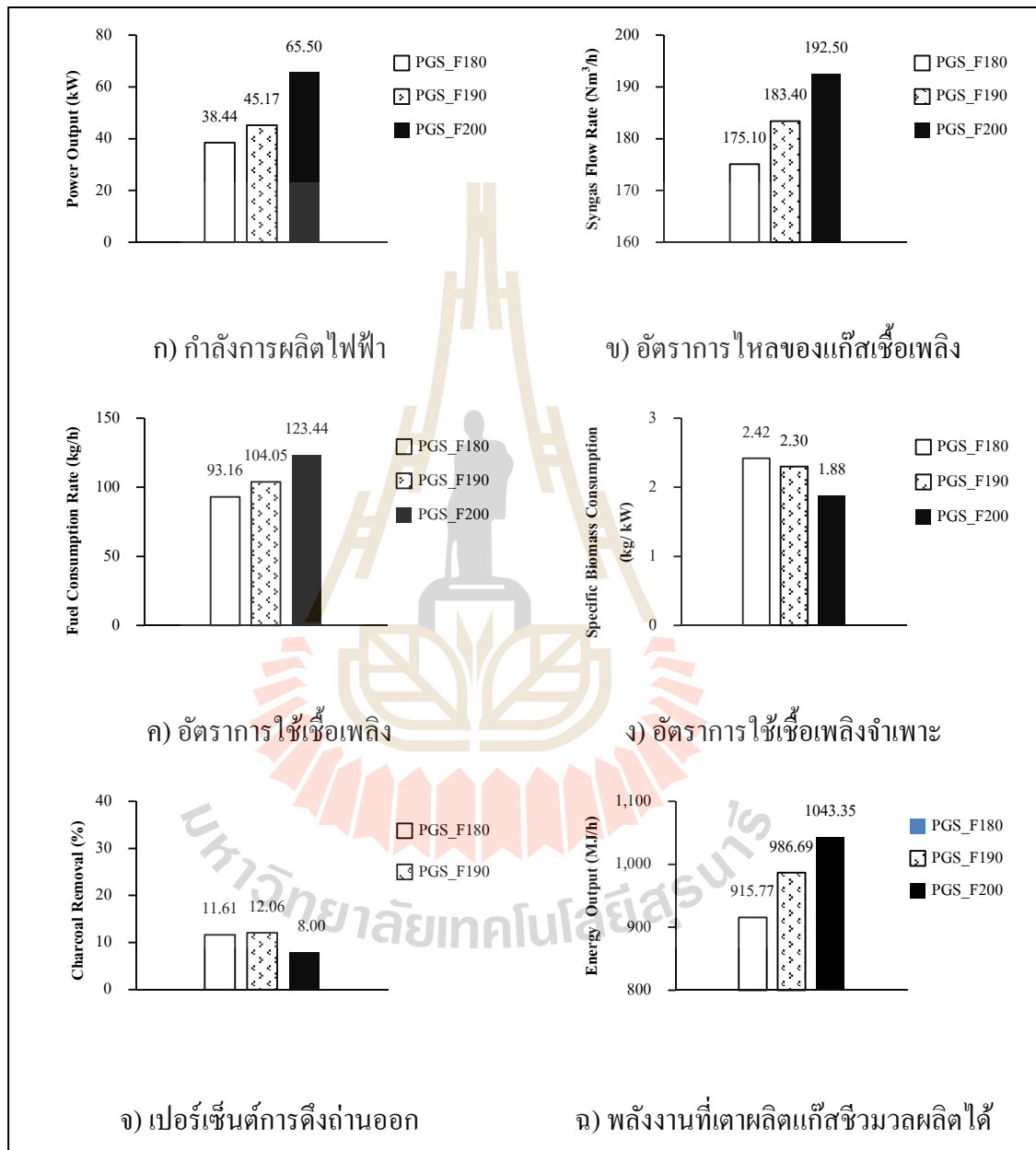
4.4.4 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

ถ่านที่ผลิตออกมาได้ที่สภาวะ PGS_F200 มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 600 mgI₂/g ซึ่งมีค่าสูงกว่า PGS_F180 และ PGS_F190 เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งอุณหภูมิจะเป็นพลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกหักตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และก๊าซต่างๆ หลุดออกไป ส่วนที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบวงแหวน อะโรมาติก ซึ่งคาร์บอนจะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงสูงตามอุณหภูมิ (ปรินทร เต็มญารศิลป์, 2551)

4.4.5 สรุปอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์

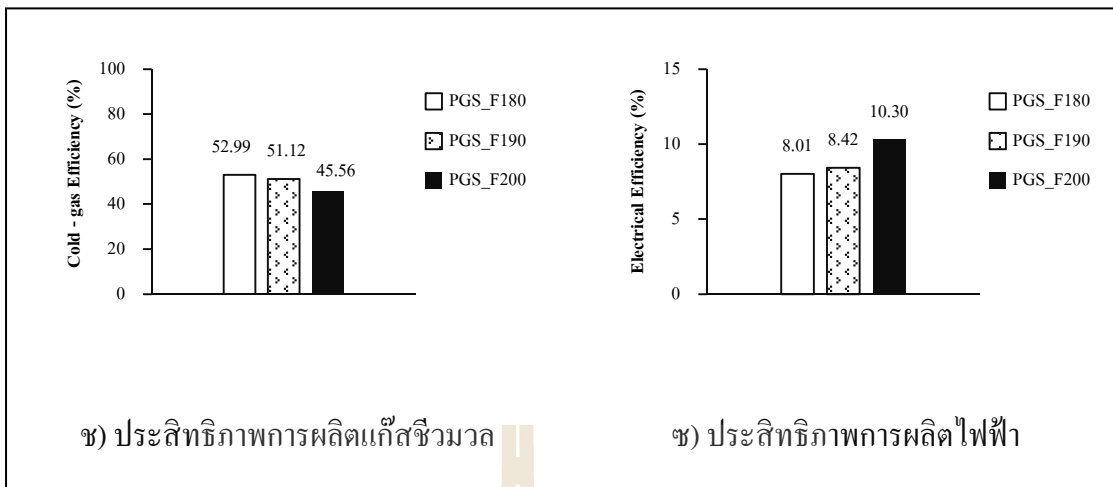
จากผลการศึกษาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ โดยพิจารณาความเหมาะสมจากกำลังการผลิตไฟฟ้า และค่าการดูดซับไอโอดีน สรุปได้ว่าอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลเท่ากับ 192.50 Nm³/h PGS_F200 มีความเหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 65.50 kW อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 1.88 kg/kW สัดส่วนการ

ป้อนไอน้ำ $0.10 \text{ kg}_{\text{Steam}}/\text{kg}_{\text{Biomass}}$ อัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ 9.87 kg/h ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีววมวล 45.56% ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 10.30% และถ่านมีค่าการดูดซับไอโอดีน $600.00 \text{ mgI}_2/\text{g}$ ใกล้เคียงกับผลการศึกษานอง วีรัชย์ อาจหาญ และคณะ (2551)

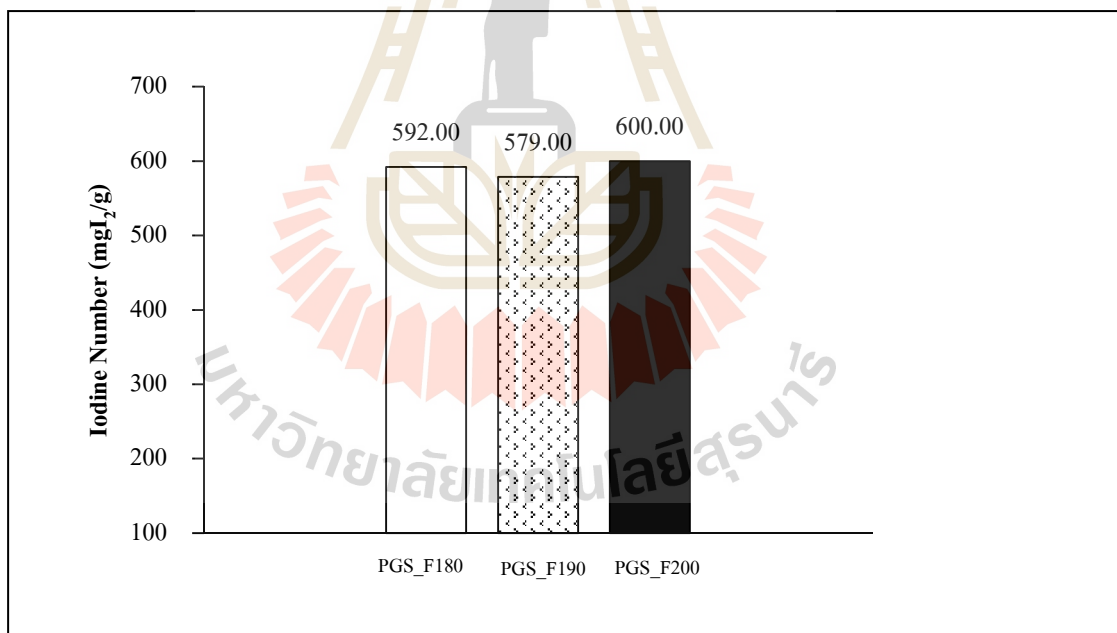


รูปที่ 4.14 สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

กรณีทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม



รูปที่ 4.14 สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน กรณีทดสอบ
หาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม (ต่อ)



รูปที่ 4.15 ค่าการดูดซับไอโอดีน กรณีทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่เหมาะสม

4.5 ผลการทดสอบหาเวลาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซ้ำ

การศึกษาค่าการเพิ่มคุณภาพของถ่านกัมมันต์ โดยนำถ่านที่ได้จากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมากระตุ้นเพื่อหาเวลาการกระตุ้นที่เหมาะสมเพิ่มภายในห้องผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้เทคโนโลยีไพโรไลซิส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซ้ำ ให้มีคุณสมบัติของการเป็นถ่านดูดซับเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยทำการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันที่สภาวะ PGS_F200 และอุณหภูมิห้องผลิตถ่านกัมมันต์ 550 °C ป้อนไอน้ำเข้าห้องผลิตถ่านกัมมันต์ความดัน 0.5 bar แบ่งออกเป็น 3 สภาวะ คือ PGS_T30 PGS_T60 และ PGS_T120 มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ดังนี้

4.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพพบว่า ลักษณะภายนอกของ PGS_T30 PGS_T60 และ PGS_T120 มีขนาดไม่เกิน 45 mm และมีความหนาแน่น 122.00 kg/m³ ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับ PGS_F200 ดังแสดงในรูปที่ 4.16

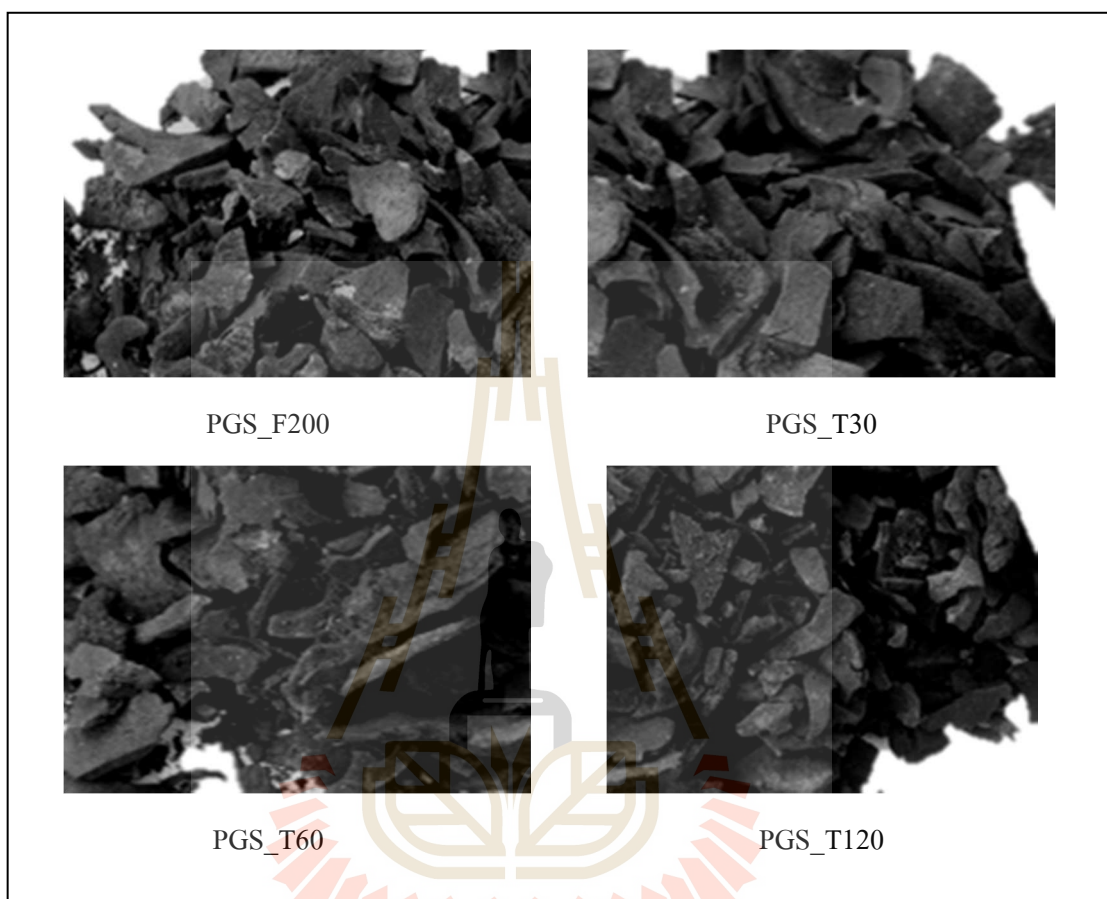
4.5.2 องค์ประกอบแบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อน

ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อน พบว่า สภาวะ PGS_T30 PGS_T60 และ PGS_T120 มีสารระเหย ฝ้า และคาร์บอนคงตัว ใกล้เคียง PGS_S0.0 และ PGS_F200 แต่ที่ PGS_T60 ค่า C มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 4.29 % เมื่อเทียบกับ PGS_S0.0 และ 0.60 % เมื่อเทียบกับ PGS_F200 และ ค่า H มีค่าลดลง 43.15 % เมื่อเทียบกับ PGS_S0.0 และ 30.49 % เมื่อเทียบกับ PGS_F200 เนื่องจาก C จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้น ตามอุณหภูมิและเวลา ส่วน H จะระเหยออกเป็นแก๊ส (Punsuwan et al., 2015) C จึงมีค่าเพิ่มขึ้น และ H มีค่าลดลง ซึ่งในการเพิ่มขึ้นของ C เมื่อป้อนไอน้ำจะส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น (Sharm et al., 2016) สูงสุด 9.41 % ที่ PGS_F200 เมื่อเทียบกับ PGS_S0.0 และเมื่อกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซ้ำด้วยไอน้ำที่เวลาต่างๆ จะส่งผลให้ค่าความร้อนของถ่านมีค่าลดลงสูงสุด 4.61 % ที่ PGS_T120 เมื่อเทียบกับ PGS_F200 เนื่องจาก H จะระเหยออกเป็นแก๊ส ส่งผลให้ถ่านมีค่าความร้อนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.17

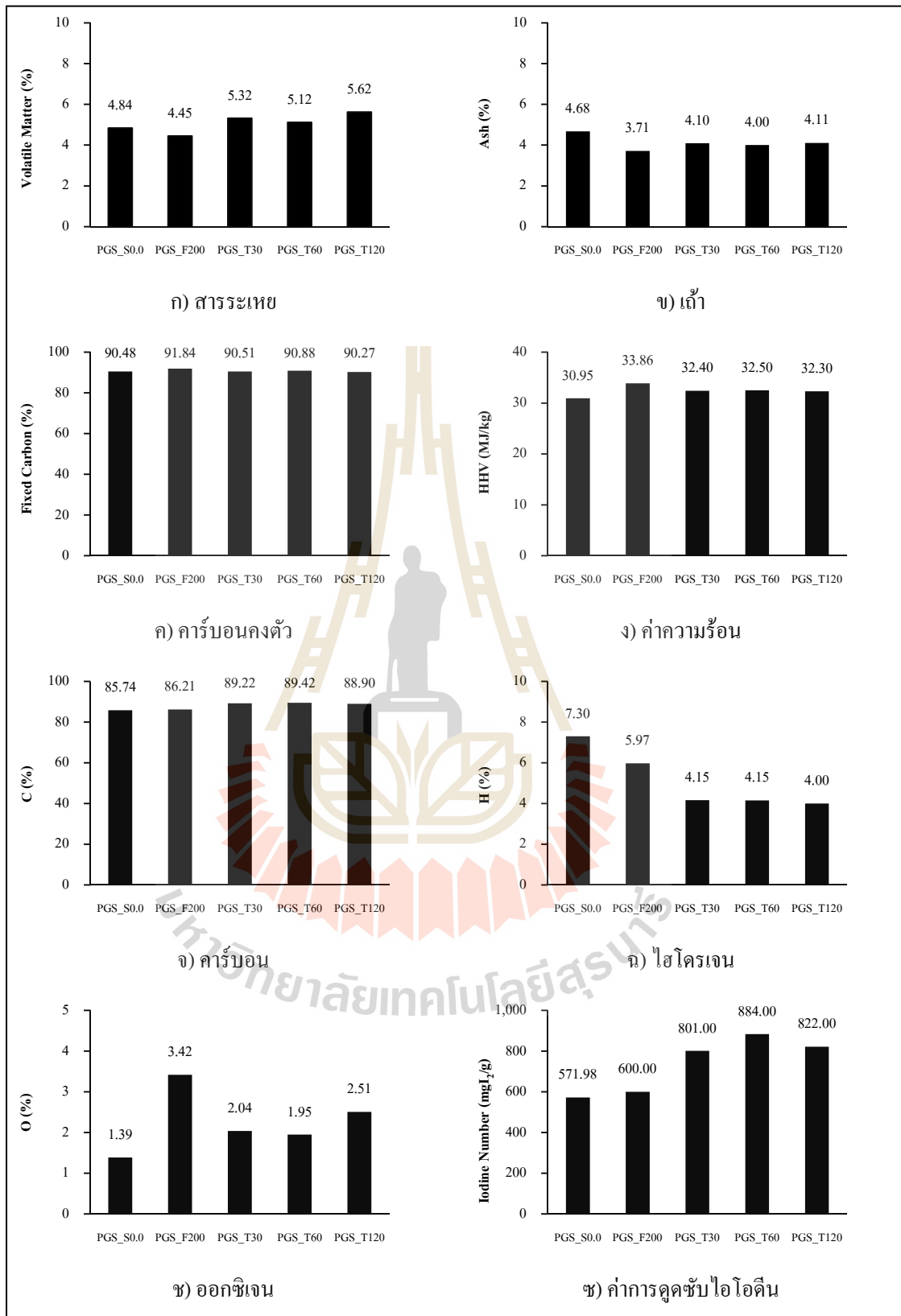
4.5.3 ค่าการดูดซับไอโอดีน

ผลการศึกษาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์สภาวะ PGS_T30 PGS_T60 และ PGS_T120 พบว่า ที่ PGS_T60 มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด 884.00 mgI₂/g เพิ่มขึ้น 47.00 % เมื่อเทียบกับ PGS_F200 และ เพิ่มขึ้น 54.00 % เมื่อเทียบกับ PGS_S0.0 เนื่องจากไอน้ำที่ใช้ในการกระตุ้นจะช่วยให้สารระเหยหลุดออกจากถ่านทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนภายในถ่านค่าการดูดซับไอโอดีนจึงเพิ่มขึ้น ต้องเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นต้องมีความเหมาะสม เพราะถ้าใช้เวลานานรูพรุนจะมีขนาดใหญ่ ค่าการดูดซับไอโอดีนจะมีค่าลดลง (Kim et al., 1988; Mozammela et al., 2002) ดังนั้นเวลา

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซ้ําที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน คือ PGS_T60 ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังกระตุ้นซ้ํา



รูปที่ 4.17 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังกระตุ้นซ้ำ

4.6 สรุปสถานะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ

จากผลการทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ สามารถสรุปได้ว่า ที่ PGS_T60 ความดันไอน้ำ 0.5 bar อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลเท่ากับ $192.50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ และ เวลาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ช้า 60 min มีความเหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 65.50 kW อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 1.88 kg/kW สัดส่วนการป้อนไอน้ำ $0.10 \text{ kg}_{\text{Steam}}/\text{kg}_{\text{Biomass}}$ อัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ 9.87 kg/h ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวมวล 45.56% ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 10.30% และค่าการดูดซับไอโอดีน $884.00 \text{ mgI}_2/\text{g}$

สถานะดังกล่าวไม่ส่งผลให้กำลังการผลิตไฟฟ้าลดต่ำลง แต่ให้คุณสมบัติความเป็นถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ ปริมาณไอน้ำ และอัตราการไหลของแก๊สสูงสุดในการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ในการศึกษาหัวข้อถัดไป

4.7 ผลการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

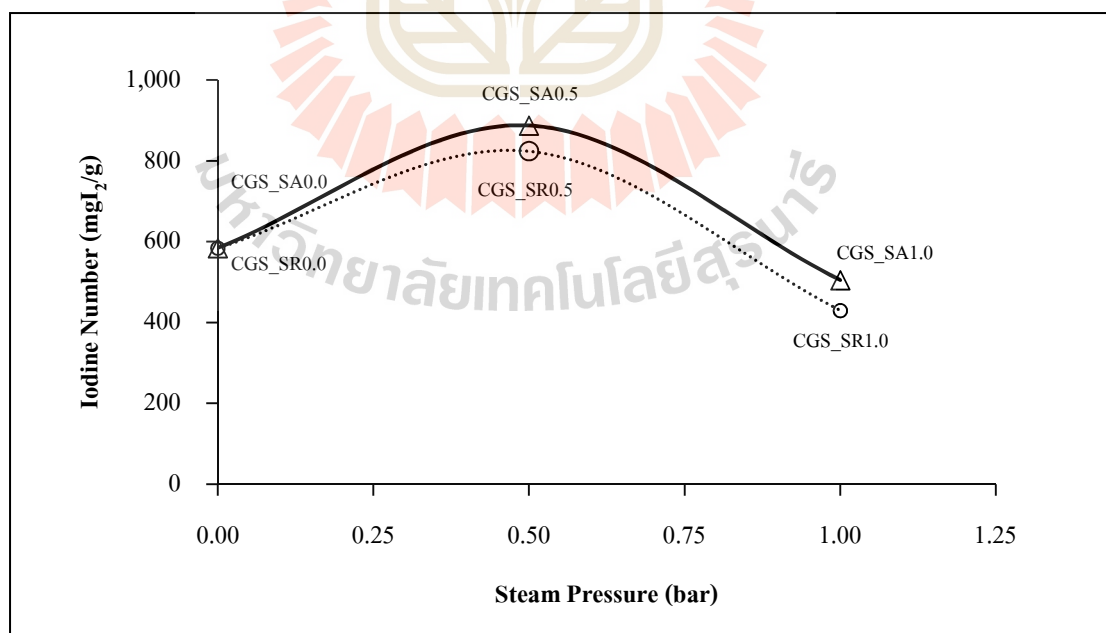
จากผลการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ แบ่งสถานะการทดสอบออกเป็น 5 สถานะ ได้แก่ CGS_SR0.0 CGS_SR0.5 CGS_SR1.0 CGS_SA0.5 และ CGS_SA1.0 มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

4.7.1 ผลการทดสอบเบื้องต้น

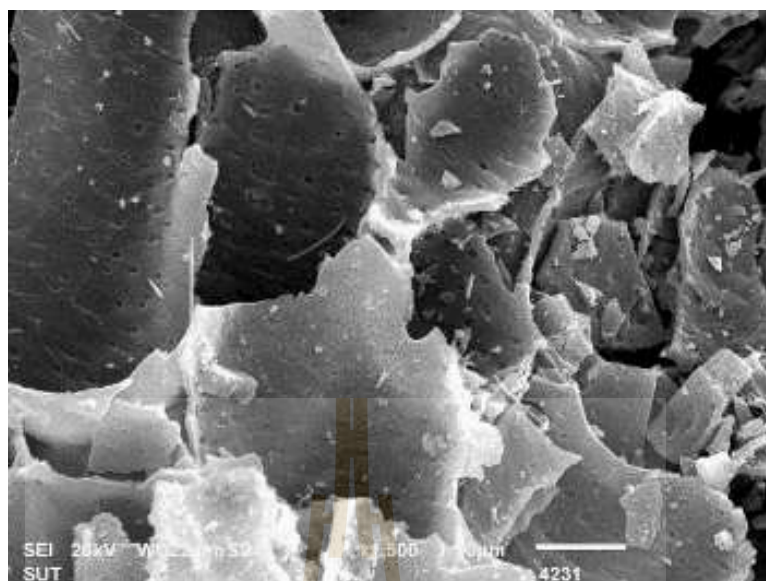
จากผลการทดสอบเบื้องต้นของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ โดยเดินระบบด้วยอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลสูงสุด เพื่อหาค่าการดูดซับไอโอดีน และสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อเนื่อง พบว่า ที่ CGS_SA0.5 มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เท่ากับ $887.53 \text{ mgI}_2/\text{g}$ เพิ่มขึ้น 52.00% เมื่อเทียบกับ CGS_SR0.0 รองลงมา คือ CGS_SR0.5 มีค่าการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ $824.09 \text{ mgI}_2/\text{g}$ เพิ่มขึ้น 41.00% เมื่อเทียบกับ CGS_SR0.0 ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาในระดับต้นแบบที่ PGS_T60 มีค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น 54.00% ซึ่ง PGS_T60 เป็นสถานะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ และผลศึกษานี้ยังมีความสอดคล้องในด้านปริมาณการป้อนไอน้ำที่ความดัน 0.5 bar และอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลสูงสุด ที่ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าสูงสุดเช่นเดียวกัน

ผลการศึกษาลักษณะรูพรุน โดยวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า CGS_SA0.5 และ CGS_SR0.5 มีลักษณะของโพรงรูพรุนจัดตัวเป็นระเบียบมากกว่า CGS_S0.0 เนื่องจาก ไอ้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้นให้สารระเหยที่หลงเหลืออยู่ในถ่านหลุดออก และอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเรียงตัวใหม่ของ C ส่วน CGS_SR1.0 และ CGS_SA1.0 มีลักษณะของโพรงรูพรุนน้อยกว่า CGS_SR0.5 และ CGS_SA0.5 เนื่องจากไอ้ไอน้ำที่ใช้มีปริมาณสูงเกินไป ไอ้ไอน้ำที่เหลืออยู่จากการกระตุ้นสารระเหยให้หลุดออกจะไปทำลายโครงสร้างรูพรุน และคุณภาพงานจากระบบ อุณหภูมิในระบบจึงลดลงส่งผลให้เกิดการเรียงตัวของ C ลดลงด้วย (Achaw et al., 2008) รูพรุนจึงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.19 ค่าการดูดซับไอ้ไอน้ำจึงมีความแตกต่างกันดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ลักษณะของรูพรุนที่ต่างกันผลมาจาก อุณหภูมิ เวลาการกระตุ้น อัตราการไหลของแก๊สชีววมวล และปริมาณ ไอ้ไอน้ำ (Huo et al., 2014; Punsuwan et al., 2015; Chaiprasert et al., 2014; Matsumura et al., 1997)

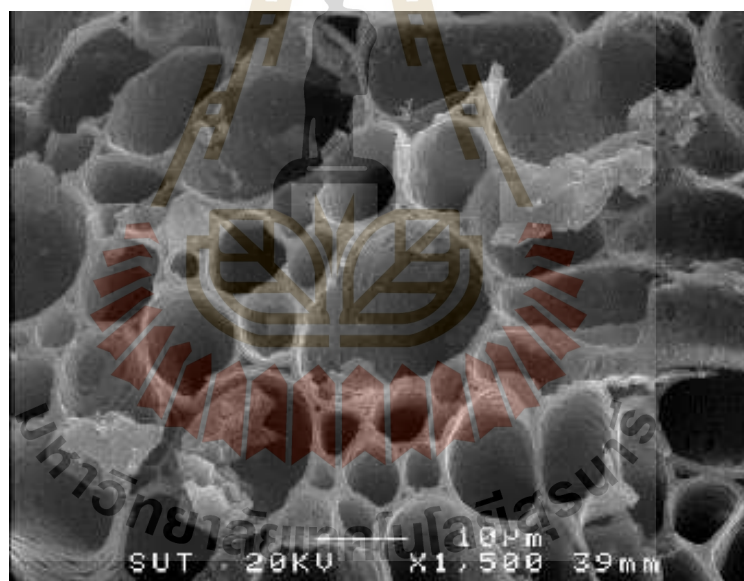
ผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น ในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์แบบต่อเนื่องในการศึกษานี้ จะเลือก CGS_SR0.5 เป็นสภาวะที่ใช้ในการเดินระบบต่อเนื่อง เพราะที่สภาวะ CGS_SA0.5 มีความแตกต่างของค่าการดูดซับไอ้ไอน้ำ เพียง 7.69 % เมื่อเทียบกับ CGS_SR0.5 แต่ CGS_SA0.5 ต้องกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซ้ำอีก 30 min ดังนั้นจึงใช้ CGS_SR0.5 เดินระบบผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ต่อเนื่อง



รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณไอ้ไอน้ำกับค่าการดูดซับไอ้ไอน้ำ กรณีผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

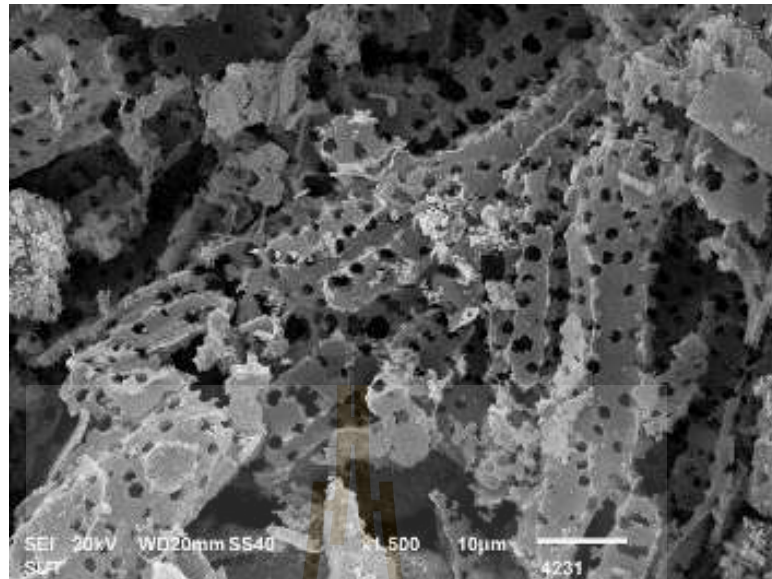


ก) CGS_S0.0

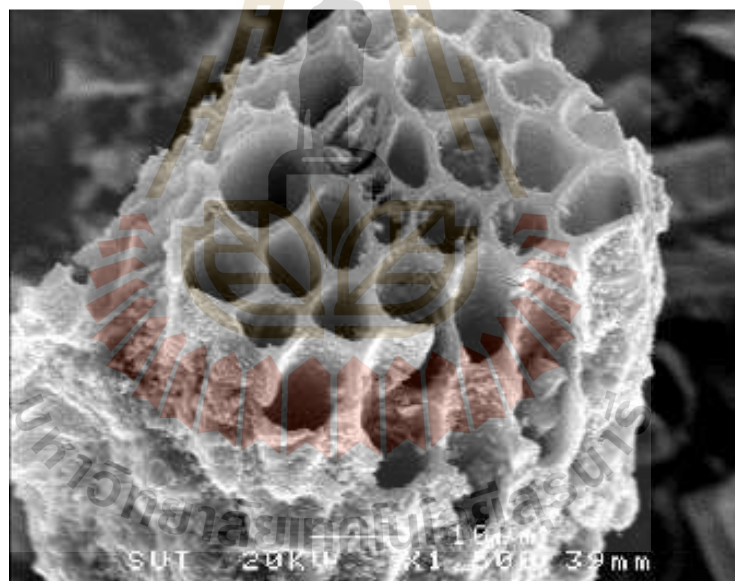


ข) CGS_SR0.5

รูปที่ 4.19 ลักษณะผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์ด้วย SEM

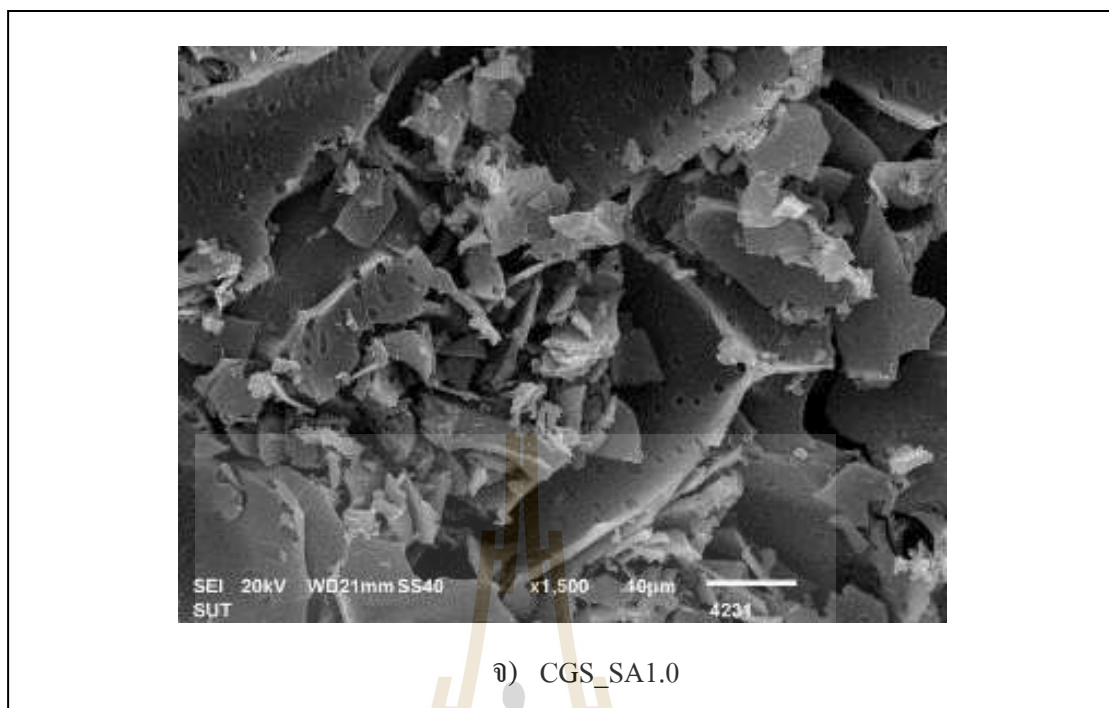


ค) CGS_SR1.0



ง) CGS_SR0.5

รูปที่ 4.19 ลักษณะผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์ด้วย SEM (ต่อ)



รูปที่ 4.19 ลักษณะผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์ด้วย SEM (ต่อ)

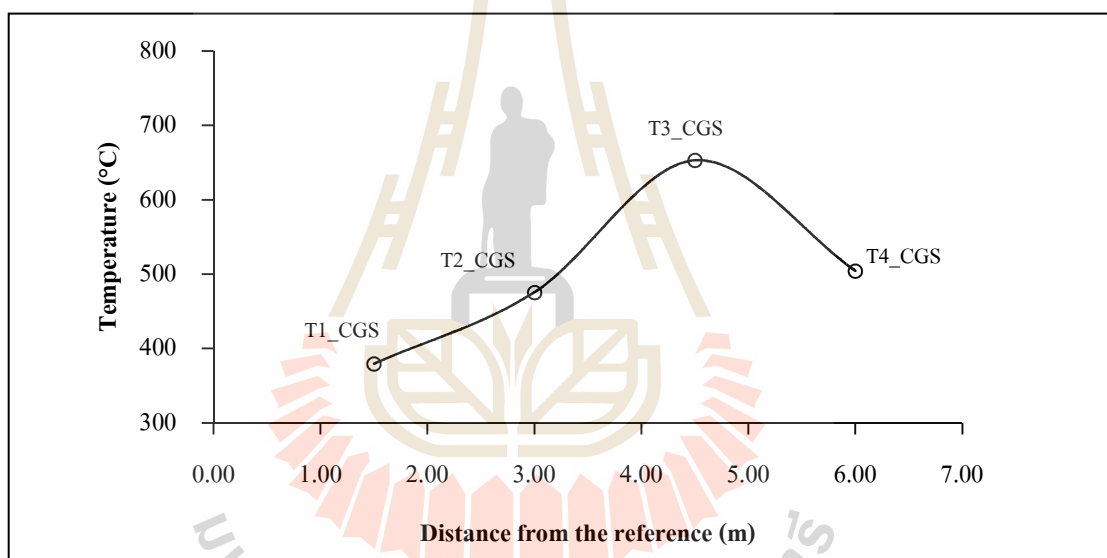
4.7.2 ผลการเดินระบบต่อเนื่อง

ในการทดสอบเดินระบบผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์แบบต่อเนื่องในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีวมวล คุณสมบัติของแก๊สชีวมวล ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และคุณสมบัติของถ่าน โดยมีผลการศึกษาดังนี้

4.7.2.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีวมวล

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยตั้งแต่ T1_CGS - T4_CGS ดังแสดงในรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าการลุกไหม้ของเชื้อเพลิงมีการลุกไหม้อย่างรวดเร็ว ในลักษณะการวาบไฟ อุณหภูมิในตำแหน่งที่ระยะความสูง T1_CGS คือ ประมาณ 379.60 °C การถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะความสูงอย่างต่อเนื่องที่ระยะ T1_CGS - T3_CGS ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 475.62 - 653.02 °C โดยการลุกไหม้ที่เกิดขึ้น จะทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ คือ คาร์บอน และไฮโดรเจน หลุดออก และจะถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาอูณหเคมี เพื่อเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ คือ แก๊สชีวมวลต่างๆ ซึ่งระดับของอุณหภูมิที่เชื้อเพลิงได้รับนี้ จะสามารถเกิดกระบวนการคาร์บอนในซ์เซชัน เพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพ เพื่อที่จะ

เข้าสู่กระบวนการกระตุ้นให้เป็นผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงต่อไป โดยอุณหภูมิที่ T3_CGS คือ โชนออกซิเดชัน เป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด และลดลงในช่วง T4_CGS คือ โชนรีดักชันโดยที่อุณหภูมิประมาณ 504 °C แก๊สชีววมวลที่ออกจากระบบที่ยังไม่ผ่านระบบทำความสะอาดมีอุณหภูมิประมาณ 501 °C และเมื่อผ่านระบบทำความสะอาด จะได้แก๊สชีววมวลที่มีอุณหภูมิประมาณ 30 °C เมื่อนำผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ มาเทียบกับผลการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ พบว่า อุณหภูมิสูงสุดของ CGS_SR0.5 มีค่าต่ำกว่า PGS_T60 10.91 % ซึ่งจะส่งผลกับคุณสมบัติของแก๊สชีววมวลที่ผลิตได้ให้มีความน้อยกว่าด้วยเช่นเดียวกัน เพราะอุณหภูมิมีผลกระทบโดยตรงกับปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันภายในเตา (Kruse, 2009)



รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สชีววมวล กรณีผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

4.7.2.2 สมบัติของแก๊สชีววมวล

จากผลการศึกษาคูณสมบัติของแก๊สชีววมวลที่ผลิตได้จากกะลามะพร้าวของการเดินระบบพบว่า มีองค์ประกอบของ CO, H₂, CH₄ และ CO₂ ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย 13.39, 16.47, 3.30 และ 13.01 % ตามลำดับ และค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลมีค่าเฉลี่ย 4.79 MJ/Nm³ เมื่อนำมาเทียบกับผลการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับ

ต้นแบบพบว่า ค่าความร้อนมีค่าลดลง 11.78 % เมื่อเทียบกับที่ PGS_T60 เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวลของ CGS_SR0.5 มีค่าต่ำกว่า PGS_T60 ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่งผลให้ CO ลดลง 13.19 % ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลจึงมีค่าลดลง (Chaiprasert et al., 2009)

4.7.2.3 สมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

ผลการศึกษาประสิทธิภาพ และสมรรถนะของระบบผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ พบว่า CGS_SR0.5 ให้กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 160.10 kW อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลสูงสุดเท่ากับ 502.50 Nm³/h ส่งผลให้พลังงานที่เตาผลิตแก๊สชีวมวลผลิตได้ มีค่าเท่ากับ 2,406.98 MJ/h อัตราการใช้เชื้อเพลิง 200 kg/h อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 1.25 kg/kW เปรอร์เซ็นต์การดึงถ่าน 5.03 % อัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ 10.05 kg/h สัดส่วนการป้อนไอน้ำ 0.20 kg_{Steam}/kg_{Biomass} ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวมวล และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 64.88 และ 15.54 % ตามลำดับ เพิ่มขึ้น 42.41 และ 50.87 % เมื่อเทียบกับ PGS_T60 ที่การผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวมวล และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้านั้นมีผลมาจากปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น ประสิทธิภาพเตาผลิตแก๊สชีวมวล อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ คุณสมบัติของไอน้ำ ระบบทำความสะอาดแก๊ส และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

4.7.2.4 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ ค่าความร้อน ค่าการดูดซับไอโอดีน พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ พบว่าถ่านที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งเป็นเชื้อเพลิง และถ่านกัมมันต์โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้ ขนาดความยาวเฉลี่ยมากกว่า 4.75 mm ความหนาแน่นเฉลี่ย 120.00 kg/m³ ความชื้นเฉลี่ย 1.10 % ดังแสดงในรูปที่ 4.21 มีค่าสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว 3.47 3.91 และ 92.62 % ตามลำดับ มีค่า C H N O และ S มีค่า 83.33 1.78 0.55 0.06 และ 10.37 % ตามลำดับ และค่าความร้อน 31.00 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ มีค่าดูดซับไอโอดีน 824.00 mgI₂/g ซึ่งจัดได้ว่าเป็นถ่านกัมมันต์ เกรดคุณภาพชั้น 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ถ่านกัมมันต์เกรดคุณภาพชั้น 1 ค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600.00 mgI₂/g) พื้นที่ผิว 447.00 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.22 m³/g โดยรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก 82.00 % และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.94 nm สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นถ่านกัมมันต์ จะมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย เนื่องจากมีลักษณะเป็นเม็ด และรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก



รูปที่ 4.21 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ กรณีผลิตพลังงานควบคู่การผลิต ถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

4.7.3 ผลการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์การผลิตพลังงานควบคู่การผลิต ถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ ประกอบไปด้วย การประเมินรายได้ การประเมินค่าใช้จ่าย และการประเมินผลตอบแทน มีรายละเอียดดังนี้

4.7.3.1 รายได้

ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ ขนาด 250 kW อัตราการใช้เชื้อเพลิงกะลามะพร้าว 200 kg/h สามารถผลิตพลังงานได้เฉลี่ย 2,407 MJ/h ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้กับเครื่องจักร และอุปกรณ์ในระบบ และคงเหลือกำลังการผลิตเฉลี่ยสุทธิเท่ากับ 160.1 kW สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 7,008 h/ปี (Plant Factor 0.8) หรือคิดเป็น 1,121,981 kWh/ปี ในส่วนนี้ไฟฟ้าที่ผลิตได้คิดทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทั้งหมด โดยค่าไฟฟ้าคำนวณที่ 3.00 บาท/หน่วย คิดเป็นรายได้ที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 3,365,943 บาท/ปี

ในส่วนของรายได้จากการผลิตถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการเกิดถ่าน 5 % ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงหรือมีอัตราการเกิดถ่านประมาณ 10 kg/h ระบบจะผลิตถ่านออกมา เท่ากับ 70,080 kg/ปี (7,008 ชั่วโมง x 10 kg/h) มีการสูญเสีย 20 % ดังนั้นจะผลิตถ่านออกมาประมาณ 63,072 kg/ปีหรือ 63.07 ตันต่อปี ราคาจำหน่ายถ่าน 50 บาท/กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่าที่ได้จากการขายถ่าน 3,153,600 บาท/ปี

4.7.3.2 ค่าใช้จ่าย

ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ ประกอบไปด้วย 1) ค่าเตรียมเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วย ขั้นตอนการอบแห้ง การร่อน และการคัดแยก 2) ค่าแรงงานทางตรง และ 3) โสหุ่ยการผลิต รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 1,906,593.78 บาทต่อปีหรือ 1.98 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า รายละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดการคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

รายการ	รายละเอียดค่าใช้จ่าย (ต่อปี)	จำนวนเงิน	บาท/หน่วย
1.ค่าเตรียมเชื้อเพลิง	ผลิต ไฟฟ้า 7,008 h x 160.10 kW x อัตราการใช้กะลามะพร้าวสด 1.77 kg/ kWh x ค่าเตรียม 0.13 บาท/kg	258,161.78	0.23
2.ค่าแรงงานทางตรง	ช่างเทคนิค 1 คน อัตรา 12,000 บาท/เดือน/ คน + แรงงาน 6 คน อัตรา 6,000 บาท/เดือน/คน	576,000.00	0.82
3.โสหุ่ยการผลิต	ค่าแรงงานทางอ้อม ค่าสารเคมี ค่าน้ำประปา และวัสดุสิ้นเปลือง	1,072,432.00	0.93
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น		1,906,593.78	1.98

4.7.3.3 ผลตอบแทน

ในการวิเคราะห์ผลตอบแทนของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์พบว่า ในการสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันใช้เงินลงทุน 20,000,000 บาท เมื่อเดินระบบผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์แล้ว จะมีค่าใช้จ่ายต่อปีประมาณ 1,906,594 บาท และรายได้ต่อปีประมาณ + 6,519,543 บาท จากการทดแทนค่าไฟฟ้า และการขายถ่านกัมมันต์ สามารถคืนทุนในระยะเวลา 4 ปี 4 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

$$\begin{aligned}
 \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \text{เงินลงทุนสุทธิ/รายได้สุทธิต่อปี} \\
 &= 20,000,000 / 4,612,949 \\
 &= 4.33 \text{ ปี (4 ปี 4 เดือน)}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดผลตอบแทนของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)	รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
เงินลงทุนระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 250 kW	- 20,000,000	ค่าใช้จ่าย - ค่าเตรียมเชื้อเพลิง - ค่าแรงงานทางตรง - โสหุ่ยการผลิต รวมค่าใช้จ่ายต่อปี รายได้ - จากการขายไฟฟ้า - จากการขายถ่าน รายได้ต่อปี	- 258,162 - 576,000 - 1,072,432 - 1,906,594 +3,365,943 +3,153,600 + 6,519,543
เงินลงทุนสุทธิ	- 20,000,000	รายได้สุทธิต่อปี	+4,612,949

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับไอน้ำ ในการกระตุ้นถ่านกะลามะพร้าวที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตพลังงานให้มีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ ที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้นจากถ่านทั่วไป โดยงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ศึกษาหาสภาวะการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ เพื่อผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม โดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากสภาวะการเดินระบบที่ทำกรป้อนไอน้ำ และอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ในการศึกษาส่วนนี้ ใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ (100 kW) และส่วนที่ 2 ศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์แบบต่อเนื่อง ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ (250 kW) สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.2 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิต

ถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ

ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ พบว่าสภาวะการป้อนไอน้ำความดัน 0.5 bar มีความเหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากให้กำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบเพิ่มขึ้น 6.34 % เมื่อเทียบกับกรณีไม่ป้อนไอน้ำ และยังสามารถเพิ่มค่าการดูดซับไอโอดีนให้กับถ่าน 4.90 % เมื่อเทียบกับกรณีไม่ป้อนไอน้ำ ให้กำลังการผลิตไฟฟ้า 65.50 kW ที่อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลสูงสุด 192.50 Nm³/h อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 1.88 kg/kW สัดส่วนการป้อนไอน้ำ 0.10 kg_{Steam}/kg_{Biomass} อัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ 9.87 kg/h ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวมวล 45.56 % และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 10.30 % ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 600.00 mgI₂/g

ผลการศึกษาการเพิ่มคุณภาพของถ่านกัมมันต์โดยนำถ่านที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมากระตุ้นซ้ำ เพื่อหาเวลาการกระตุ้นที่เหมาะสมเพิ่มภายในห้องผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้เทคโนโลยีไพโรไลซิส ด้วยไอน้ำ ความดัน 0.5 bar อุณหภูมิการกระตุ้น 550 °C พบว่า เวลาการกระตุ้นเพิ่ม 60 min

ส่งผลให้ค่าการดูดซับ ไอโอไดน์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 884.00 mgI₂/g ซึ่งเพิ่มขึ้นจากสภาวะการกระตุ้นครั้งแรกภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล 47.33 %

5.3 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย

ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์

ผลการทดสอบผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์แบบต่อเนื่อง 80 h โดยเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลสูงสุด แล้วป้อนไอน้ำเข้าสู่เตาผลิตแก๊สชีวมวล ที่ความดันไอน้ำ 0.5 bar พบว่า สามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 160.10 kW อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลเท่ากับ 502.50 Nm³/h อัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉพาะ 1.25 kg/kW หรือ 200 kg/h และมีอัตราการเกิดถ่าน 10.05 kg/h ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล 64.88 % ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 15.54 % ถ่านมีค่าการดูดซับไอโอไดน์ เท่ากับ 824.09 mgI₂/g จัดได้ว่าเป็นถ่านกัมมันต์ เกรดคุณภาพชั้น 1 มีพื้นที่ผิว 447.00 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.22 m³/g โดยรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็กถึง 82.00 % และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.94 nm ถ่านกัมมันต์นี้

ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนของการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ พบว่า ในการสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันใช้เงินลงทุน 20,000,000 บาท เมื่อเดินระบบผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์แล้ว จะมีค่าใช้จ่ายต่อปีประมาณ 1,906,594 บาท และรายได้ต่อปีประมาณ 6,519,543 บาท จากการทดแทนค่าไฟฟ้า และการขายถ่านกัมมันต์ สามารถคืนทุนในระยะเวลา 4 ปี 4 เดือน

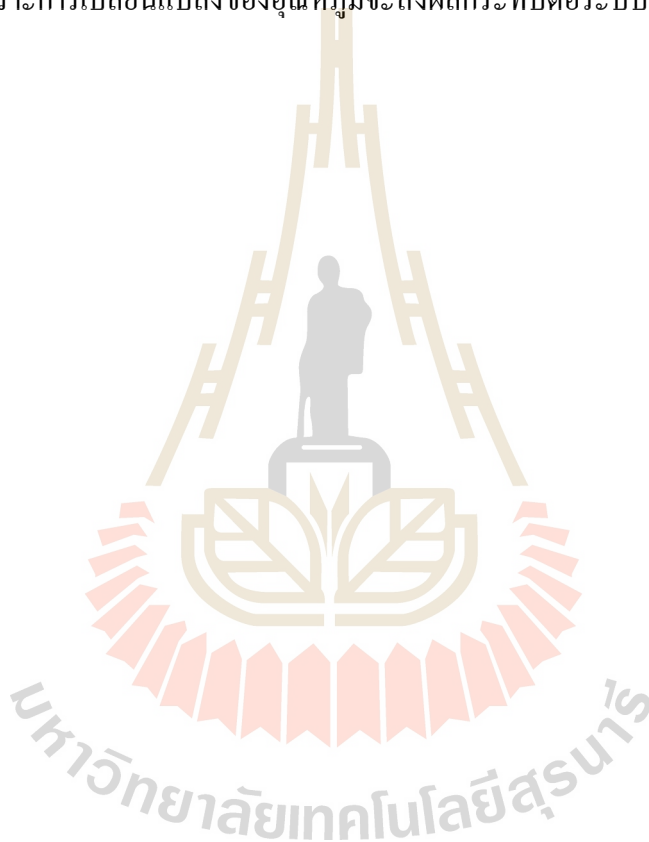
จากศึกษาทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์จากเชื้อเพลิงกะลามะพร้าว ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต เป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อลดการพึ่งพิงการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ช่วยเพิ่มภาพลักษณ์ในเชิงบวกของอุตสาหกรรมอย่างยิ่ง

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในงานวิจัยนี้ใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ จึงควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มในด้านการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำก่อนป้อนเข้าเตาผลิตแก๊สชีวมวล
- 2) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปกระตุ้นซ้ำเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความเป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงที่มีค่าการดูดซับไอโอไดน์มากกว่า 1,000 mgI₂/g ได้

ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงวิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซ้ำดังกล่าว ให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตในขั้นต้นด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน และในการศึกษาควรเลือกวิธีการกระตุ้นที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ และเป็นวิธีการอย่างง่ายเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการผลิตควบคู่กับการผลิตพลังงาน

3) เตาผลิตแก๊สชีววมวลเป็นห้องกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่มีแหล่งพลังงานที่ผลิตได้เอง ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการหาสารกระตุ้นชนิดใหม่มาทำการศึกษาทดลองแทนไอน้ำเพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับถ่านกัมมันต์ แต่สารที่นำมาใช้แทนไอน้ำนั้น ต้องไม่ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวลเปลี่ยนแปลงเพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อระบบผลิตพลังงาน



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับไอน้ำ ในการกระตุ้นถ่านกะลามะพร้าวที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตพลังงานให้มีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ ที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้นจากถ่านทั่วไป โดยงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ศึกษาหาสภาวะการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ เพื่อผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม โดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากสภาวะการเดินระบบที่ทำกรป้อนไอน้ำ และอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ในการศึกษาส่วนนี้ ใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ (100 kW) และส่วนที่ 2 ศึกษาการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์แบบต่อเนื่อง ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับเชิงพาณิชย์ (250 kW) สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.2 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิต

ถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ

ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันระดับต้นแบบ พบว่าสภาวะการป้อนไอน้ำความดัน 0.5 bar มีความเหมาะสมในการผลิตพลังงานควบคู่การผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากให้กำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบเพิ่มขึ้น 6.34 % เมื่อเทียบกับกรณีไม่ป้อนไอน้ำ และยังสามารถเพิ่มค่าการดูดซับไอโอดีนให้กับถ่าน 4.90 % เมื่อเทียบกับกรณีไม่ป้อนไอน้ำ ให้กำลังการผลิตไฟฟ้า 65.50 kW ที่อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลสูงสุด 192.50 Nm³/h อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 1.88 kg/kW สัดส่วนการป้อนไอน้ำ 0.10 kg_{Steam}/kg_{Biomass} อัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ 9.87 kg/h ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวมวล 45.56 % และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 10.30 % ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 600.00 mgI₂/g

ผลการศึกษาการเพิ่มคุณภาพของถ่านกัมมันต์โดยนำถ่านที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมากระตุ้นซ้ำ เพื่อหาเวลาการกระตุ้นที่เหมาะสมเพิ่มภายในห้องผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้เทคโนโลยีไพโรไลซิส ด้วยไอน้ำ ความดัน 0.5 bar อุณหภูมิการกระตุ้น 550 °C พบว่า เวลาการกระตุ้นเพิ่ม 60 min

ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงวิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซ้ำดังกล่าว ให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตในขั้นต้นด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน และในการศึกษาควรเลือกวิธีการกระตุ้นที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ และเป็นวิธีการอย่างง่ายเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการผลิตควบคู่กับการผลิตพลังงาน

3) เตาผลิตแก๊สชีวมวลเป็นห้องกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่มีแหล่งพลังงานที่ผลิตได้เอง ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการหาสารกระตุ้นชนิดใหม่มาทำการศึกษาทดลองแทนไอน้ำเพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับถ่านกัมมันต์ แต่สารที่นำมาใช้แทนไอน้ำนั้น ต้องไม่ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวลเปลี่ยนแปลงเพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อระบบผลิตพลังงาน



รายการอ้างอิง

- เกศศิริ เหล่าวัชรสุวรรณ. (2555). การเตรียมและศึกษาก้าน้ำมันจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ปีที่ 31 (3).
- บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชช. ก้าน้ำมัน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. ออนไลน์.
<https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge>.
- ปริญทร์ เต็มญารศิลป์. (2551). การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของก้าน้ำมันจากไผ่ตงและไผ่หมาจู. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีรชัย อัจหาญ และคณะ. (2551). การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. รายงานการวิจัยเสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.).
- วีรชัย อัจหาญ และคณะ. (2552). การศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อนำมาผลิตพลังงานและก้าน้ำมัน (กรณีศึกษา: เศษวัสดุกะลามะพร้าว และใยบริษัท อ่าพลพุดส์ โพรเซสซิ่ง จำกัด). รายงานโครงการเสนอโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย: ITAP.
- วีรชัย อัจหาญ และคณะ. (2554). การศึกษาแนวทางพัฒนาก้านน้ำมันคุณภาพสูงโดยวิธีการกระตุ้นด้วย ไออน้ำด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (กรณีศึกษา: เศษวัสดุกะลามะพร้าว บริษัท อ่าพลพุดส์ โพรเซสซิ่ง จำกัด). รายงานโครงการ เสนอโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย: ITAP.
- วีรชัย อัจหาญ และคณะ. (2554). การศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษวัสดุกะลามะพร้าวเพื่อนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าและก้านน้ำมัน โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11.
- วีรชัย อัจหาญ และคณะ. (2555). การผลิตความร้อนจากกะลาและใยมะพร้าวโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ขนาด 300 กิโลกรัม ชีวมวล/ชั่วโมง. รายงานโครงการเสนอสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ: NIA.
- วีรชัย อัจหาญ และคณะ. (2012). การศึกษาวิจัยการใช้ประโยชน์จากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อนำมาผลิตพลังงานและก้านน้ำมัน. รายงานฉบับสมบูรณ์เสนอสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- วรพจน์ ขำพิศ และคณะ. (2556). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ก้านน้ำมันจากจี๊ดโรงไฟฟ้าชีวมวล (เชิงพาณิชย์). รายงานฉบับสมบูรณ์เสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

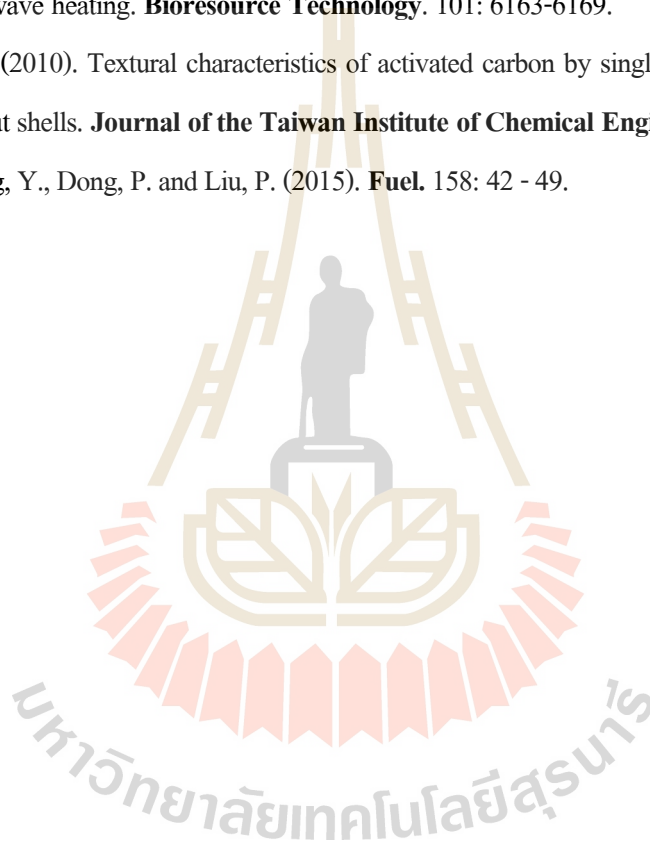
- วรพจน์ ขำพิศ และคณะ. (2552). การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน (ระยะที่ 2). รายงานการวิจัยเสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.).
- Achaw, O -W. and Afrane, G. (2008). The evolution of the pore structure of coconut shells during the preparation of coconut shell-based activated carbons. **Microporous and Mesoporous Materials**. 112: 284 - 290.
- Ander L. (2011). NaOH-activated carbon of high surface area produced from coconut shell. Kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption. **chemical Engineering Journal**. 174: 117 - 125.
- Arjhar, W., Hinsui, T., Liplap, P. and Raghavan, G. S. V. (2012). Evaluation of Energy Production from Different Biomass Feedstock Using a Pilot Scale Downdraft Gasifier. **Biobase Materials and Bioenergy**. 6: 1 - 11.
- Basu, P. (2010). **Biomass Gasification and Pyrolysis**. Elsevier. USA: 117 - 132.
- Buragohain, B., Mahanta, P., Vijayanand, S. and Moholkar. Biomass gasification for decentralized power generation. **The Indian perspective. Renewable and Sustainable Energy**. 14: 73 - 92.
- Chaiprasert, P., Vitidsant, T. (2009). Promotion of Coconut Shell Gasification by Steam Reforming on Nickel-Dolomite. **American Journal of Applied Sciences**. 6(2): 332 - 336.
- Choi, Y-K., Cho, M-H. and Kim, J-S. (2015). Steam/oxygen gasification of dried sewage sludge in a two-stage gasifier: Effects of the steam to fuel ratio and ash of the activated carbon on the production of hydrogen and tar removal. **Energy**. 91: 160 - 167.
- Conesa. J.A., Sakurai, M., Antal, M. J., Jr. (2000). Synthesis of a high-yield activated carbon by **oxygen gasification of macadamia nut shell charcoal in hot liquid water Carbon** 38: 839 - 848.
- Dascomb, J., Krothapalli, A., Fakhrai, R. (2013). Thermal conversion efficiency of producing hydrogen enriched syngas from biomass steam gasification. **International journal of hydrogen energy** 38: 11790 - 11798.
- Gai, C., Guo, Y., Liu, T., Peng, N. and Liu, Z. (2016). Hydrogen-rich gas production by steam gasification of hydrochar derived from sewage sludge. **Science Direct. International journal of hydrogen energy**. 41: 3363-3372.

- Guo, S. et al. (2009). Effects of CO₂ activation on porous structures of coconut shell-based activated carbons. **Applied Surface Science**. 255: 8443 - 8449.
- Guo, Y., Wang, S. Z., Xu, D.H., Gong, Y.M., Ma, H.H. and Tang X.Y. (2010). Review of catalytic supercritical water gasification for hydrogen production from biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14: 334 - 343
- Hernandez, J. J. et al. (2012). Effect of steam content in the air-steam flow on biomass entrained flow gasification. **Fuel Processing Technology**. 99: 43-55.
- Huo, W., Zhou, Z., Wang, F., Wang, Y. and Yu, G. (2014). Experimental study of pore diffusion effect on char gasification with CO₂ and steam. **Fuel**. 131: 59 - 65.
- Hu, Z., Srinivasan, M. P. (1999). Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell. **Microporous and Mesoporous Materials**. 27: 11-18.
- Kaewpanha, M. et al. (2014). Steam co-gasification of brown seaweed and land-based biomass. **Fuel Processing Technology**. 120: 106 - 112.
- Kanniappan, K. (2013). Production of Biomass by Gasification Using Coconut Shell. **International Journal of Science and Research**. 2319 - 7064.
- Kim, S. C. and Hong, I. K. (1998). Pore Development of the Activated Carbon Prepared by Steam Activation Process. **Industrial and Engineering Chemistry**. 4(3): 177-184.
- Kruse, A. (2009). Hydrothermal biomass gasification. **The Journal of Supercritical Fluids**. J. 47: 391 - 399.
- Le, W. et al. (2008). Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. **Industrial crops and products**. 28: 190-198.
- Li, W. et al. (2009). Preparation of activated carbon from coconut shell chars in pilot-scale microwave heating equipment at 60 kW. **Waste Management**. 29: 756 - 760.
- Li, W., Li, Q., Chen, R., Wu, Y. and Zhang, Y. (2014). Investigation of hydrogen production using wood pellets gasification with steam at high temperature over 800 °C to 1435 °C. **International journal of hydrogen energy**. 3(9): 5580 - 5588.
- Lv, P. M. et al. (2004). An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed. **Bioresource Technology**. 95: 95 - 101.

- Maneerung, T., Liew, J., Dai, Y., Kawi, S., Chong, C. and Wang, C-H. (2016). Activated carbon derived from carbon residue from biomass gasification and its application for dye adsorption: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. **Bioresource Technology**. 200: 350 - 359.
- Matsumura, Y. (1997). Gasification characteristics of an activated carbon in supercritical water. **Carbon**. 35(6): 819 - 824.
- Matsumura, Y., Nuessle, F. W. and Antal, M. J., Jr. Gasification characteristics of an activated carbon catalyst during the decomposition of hazardous waste material in supercritical water. **Hawaii Natural Energy Institute**. University of Hawaii at Manoa. Honolulu. HI 96822.
- Moghadam, R. A., Yusup, S., Azlina, W., Nehzati, S. and Tavasolid, A. (2014). Investigation on syngas production via biomass conversion through the integration of pyrolysis and air - steam gasification processes. **Energy Conversion and Management**. 87: 670 - 675.
- Mckendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2) : Conversion technologies. **Bioresource Technology**. 83: 47 - 54.
- Mozammela, H. M. et al. (2002). Activated charcoal from coconut shell using $ZnCl_2$ activation. **Biomass and Bioenergy**. 22: 397 - 400.
- Mun, T - Y., Seon, P - G. and Kim, J - S. (2010). Production of a producer gas from woody waste via air gasification using activated carbon and a two-stage gasifier and characterization of tar. **Fuel**. 89: 3226 - 3234.
- Parvez, A. M., Mujtaba, I. M. and Wu, T. (2016). **Energy exergy and environmental analyses of conventional, steam and CO_2 -enhanced rice straw gasification**. 94: 579 - 588.
- Pillai, M. G., Simha, P. and Gugalia, A. (2014). Recovering urea from human urine by bio-sorption onto Microwave Activated Carbonized Coconut Shells: Equilibrium, kinetics, optimization and field studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 2: 46 - 55.
- Punsuwan, N., Tangsathikulchai, C., Takarada, T. (2015). Low Temperature Gasification of Coconut Shell with CO_2 and KOH: Effects of Temperature, Chemical Loading, and Introduced Carbonization Step on the Properties of Syngas and Porous Carbon Product. Hindawi Publishing Corporation. **International Journal of Chemical Engineering**. Article ID 481615.
- Parthasarathy, P. and Narayanan, K. S. (2014). Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield e A review: **Renewable Energy**. 66: 570 - 579.

- Rupesh, S., Muraleedharan, C. and Arun, P. (2015). A comparative study on gaseous fuel generation capability of biomass materials by thermo-chemical gasification using stoichiometric quasi-steady-state model. **Int J Energy Environ Eng.** 6: 375 - 384.
- Rupesh, S., Muraleedharan, C. and Arun, P. (2014). Analysis of Hydrogen Generation through Thermochemical Gasification of Coconut Shell Using Thermodynamic Equilibrium Model Considering Char and Tar. Hindawi Publishing Corporation. **International Scholarly Research Notices.** Article ID 654946.
- Sharm, S. and Sheth, P.N. (2016). Air - steam biomass gasification: Experiments, modeling and simulation. **Energy Conversion and Management.** 110: 307 - 318.
- Senapati, P.K. and Behera, S. (2012). Experimental investigation on an entrained flow type biomass gasification system using coconut coir dust as powdery biomass feedstock. **Bioresource Technology.** 117: 99 - 106.
- Sreejith, C. C., Muraleedharan, C. and Arun, P. (2015). Air - steam gasification of biomass fluidized bed with CO₂ absorption: A kinetic model for performance prediction. **Fuel Processing Technology.** 130: 197 - 207.
- Stiegel, G. J. and Maxwell, R.C. (2001). Gasification technologies: the path to clean, affordable energy in the 21st century. **Fuel Processing Technology.** 71: 79 - 97.
- Tangsathitkulchai, C., Junpirom, S. and Katesa, J. (2012). Comparison of Kinetic Models for CO₂ Gasification of Coconut-Shell Chars: Carbonization Temperature Effects on Char Reactivity and Porous Properties of Produced Activated Carbons. **ENGINEERING JOURNAL.** 17(1).
- Tan, I. A. W., Ahmad, A. L. and Hameed, B. H. (2008). Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology. **Chemical Engineering Journal** 137: 462 - 470.
- Tan, I.A.W., Ahmad, A. L. and Hameed, B. H. (2008). Preparation of activated carbon from coconut husk: Optimization study on removal of 2,4,6-trichlorophenol using response surface methodology. **Journal of Hazardous Materials.** 153 : 709 - 717.
- Tursun, Y., Xu, S., Wang, C., Xiao, Y. and Wang, G. (2016). Steam co-gasification of biomass and coal in decoupled reactor. **Fuel Processing Technology.** **Fuel Processing Technology.** 141: 61 - 67.
- Wei, S., Li, Z. and Yaping, Z. (2006). Preparation of Microporous Activated Carbon from Raw Coconut Shell by Two-step Procedure. **Chines J. Chem.Eng.** 14(2): 266 - 269.

- Xu, Z. R., Zhu, W. and Li, M. (2012). Influence of moisture content on the direct gasification of dewatered sludge via supercritical water. **International Journal of Chemical Engineering** Volume: 2015. Article ID 481615.
- Yamaguchia, D., P, Sandersonb, J., Limb, S. and Ayea, L. (2009). Supercritical water gasification of Victorian brown coal: Experimental characterization. **International journal of hydrogen energy**. 34: 3342 - 3350.
- Yang, K. et al. (2010). Preparation of high surface area activated carbon from coconut shells using microwave heating. **Bioresource Technology**. 101: 6163-6169.
- Yang, K. et al. (2010). Textural characteristics of activated carbon by single step CO₂ activation from coconut shells. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 41: 367 - 372.
- Zhai, M., Zhang, Y., Dong, P. and Liu, P. (2015). **Fuel**. 158: 42 - 49.





ภาคนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพวัตถุดิบ

ก1.1 ความหนาแน่น

วิธีการทดลองนำมาจัดเรียงให้ชิดกันที่สุดในภาชนะขนาด 50 x 50 x 50 cm³ นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล คำนวณของตัวอย่างต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน

ก1.2 ความหนาแน่นหลังการอัด

วิธีการทดลอง ทำการวัดค่ามวลต่อปริมาตรของตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณตามสมการที่ (ก1)

$$\text{Density} = \frac{\text{Mass (kg)}}{\text{Volume (m}^3\text{)}} \quad (\text{ก1})$$

ก1.3 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่าง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105 ± 1°C เป็นเวลา 30 min จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desiccator) ที่ทิ้งไว้ประมาณ 15 min จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก

- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 g ลงในถาด อลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 1 h หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 min จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายใน ทำการบันทึกผล จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก2)

$$M(wb) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W} \quad (\text{ก2})$$

เมื่อ

M (wb) คือ ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)

W_1	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (g)
W_2	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (g)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)

ก2 การหาค่าประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis)

การหาค่าประกอบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ก2.1 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 30 min จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desiccator) ที่ทิ้งไว้ประมาณ 15 min จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก

- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 g ลงในถาด อลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 1h หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ min จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝามีตัวอย่าง ที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก3)

$$M(db) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W_2 - W_0} \quad (ก3)$$

เมื่อ

$M(db)$	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis)
W_0	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ใช้ในการทดลอง (g)

W_1	คือ	น้ำหนักของถาดลูมิเนียมพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (g)
W_2	คือ	น้ำหนักของถาดลูมิเนียมพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (g)

ก2.2 เถ้า (Ash)

- เเผาครุชชีเบลพอร์ซเลน (Porcelain Crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 1 h จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเตลิกเตเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนประมาณ 1 g
- นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน รอจนควันระเหยออกหมด
- ใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 h หรือรอจนน้ำหนักเถ้าคงที่
- นำครุชชีเบลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเตลิกเตเตอร์ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผลแล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก4)

$$A = 100 \times \frac{(W_3 - W_4)}{W} \quad (\text{ก4})$$

เมื่อ

A	คือ	ร้อยละของเถ้า
W_3	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (g)
W_4	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา (g)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)

ก2.3 ปริมาณสารระเหย

- เเผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ทิ้งไว้ประมาณ 30 min จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเตลิกเตเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาและทำการบันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 g

- ปิดฝาครุชชีเบิลให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อน โดยให้อยู่เหนือปากเตาเผา ที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C เป็นเวลาประมาณ 6 g
- หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 °C ทิ้งไว้เป็นเวลา ประมาณ 10 min
- หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950 °C เป็นเวลาประมาณ 6 min
- นำครุชชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในเคสิเกเตอร์ ประมาณ 15 min จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก5)

$$V = 100 \times \frac{(W_5 - W_6)}{W} \quad (ก5)$$

เมื่อ

V	คือ	ร้อยละของสารระเหย
W_5	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการเผา (g)
W_6	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการเผา (g)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)
M	คือ	ร้อยละของความชื้น

ก2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณ ได้ตามสมการที่ (ก6)

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของเถ้า} \quad (ก6)$$

ก2.5 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific Value)

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015 - 77 โดยนำตัวอย่างตัวอย่างแห้งบดละเอียด อัดเป็นเม็ด พันด้วยลวดเผาไหม้ (Ignition Wire) ใต้งในถ้วยตัวอย่าง วางในเครื่องบอมบ์ปิดฝา อัดแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ เข้าไปด้วยความดัน 30 kg/cm³ ประมาณ 5 min แล้วประกอบเข้าในถัง (Jacket) เต็มน้ำ ประมาณ

1800 ml กดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนคงที่ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำ แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่าง โดยเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการ บอมป์ Benzoic Acid มาตรฐาน

ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวก ไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้แก๊ส คาร์บอน ไดออกไซด์ และน้ำ (ซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำ) ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปชั่งน้ำหนักให้ละเอียดมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันภายใน Bomb Calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมป์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (ก7)

$$Q = m.c.\Delta T \quad (ก7)$$

เมื่อ

Q	คือ	ปริมาณความร้อน (MJ/kg)
m	คือ	มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (kg)
c	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.186 kJ/kg)
ΔT	คือ	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ($^{\circ}\text{C}$)

ก.3 การหาคุณสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

ก3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental Analyzer นำตัวอย่างบดให้ละเอียด ชั่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1 - 2 mg ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925°C ภายใต้ ออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าไปใน Region CO_2 H_2O N_2 ความคุมความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรให้คงที่

ก3.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนของเชื้อเพลิงตัวอย่าง หาได้จากการคำนวณดังสมการที่ (ก8)

$$\%O = 100 - \%C - \%H - \%N - \%S - Ash \quad (\text{ก8})$$

ก.4 วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ตามวิธี ASTM D 4607 - 86 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังนี้

1. สารเคมีที่ใช้ และวิธีการเตรียม

1.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตรเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนักปริมาตร 70 cm³ ในน้ำกลั่นปริมาตร 550 cm³

1.2 สารละลายไอโอดีน (I₂) เข้มข้น 0.1 N ชั่งไอโอดีน 12.7 g และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.10 g ผสมให้เข้ากันในสภาพที่เป็นของแข็ง เติมน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย 2 - 5 cm³ แล้วกวนให้เข้ากันจากนั้นค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงไปกวนตลอดเวลาจนได้ปริมาตร 75 ± 2.5 cm³ แล้วกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลาอย่างน้อย 4 h เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลายหมด แล้วนำไปเจือจางให้มีปริมาตร 1 L เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา

1.3 สารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃·5H₂O) เข้มข้น 0.1 N ชั่งโซเดียมไซโอซัลเฟต 24.820 g แล้วเติมน้ำกลั่นที่เดือดใหม่ๆ ปริมาตร 75 ± 2.5 cm³ คนให้ละลายแล้วเติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.12 g เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไซโอซัลเฟต เนื่องจากแบคทีเรีย แล้วเจือจางให้มีปริมาตร 1 L ในขวดวัดปริมาตร เก็บไว้ในขวดสีชาเป็นเวลาอย่างน้อย 4 วันก่อนนำมาใช้

1.4 สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO₃) เข้มข้น 0.1 N ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดตให้ได้น้ำหนัก 3.5667 g อบที่อุณหภูมิ 103 - 105 °C เป็นเวลา 2 h ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นก่อนนำไปละลายในน้ำกลั่น 100 cm³ แล้วเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 L เก็บไว้ในขวดที่มีฝาปิดมิดชิด

1.5 สารละลายน้ำแป้ง ชั่งแป้งหนัก 0.1 ± 0.5 g ผสมกับน้ำกลั่น 100 cm³ ต้มจนได้สารละลายใสและกวนตลอดเวลา (น้ำแป้งควรเตรียมใหม่ทุกครั้งทำการทดลอง)

2. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

ไอโอดีน (KI) 2.00 ± 0.01 g ลงไปเขย่าให้ละลาย เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก 5 cm^3 หยดสารละลายน้ำแข็ง ลงไป 2 - 3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ไทเทรตจากสีเหลืองจนใสไม่มีสี

$$NI = (P1 \times R)/S \quad (\text{ก9})$$

เมื่อ $N1$ = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, N
 $P1$ = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต, mL
 R = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต, N
 S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, mL

2.2 ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

เปิดสารละลายไอโอดีนปริมาตร 25 cm^3 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 cm^3 แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจนได้สารละลายที่มีสีเหลืองอ่อน หยดสารละลายน้ำแข็ง ลงไป 2 - 3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์แล้วไทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนโดย

$$N2 = (S \times NI)/I \quad (\text{ก10})$$

เมื่อ $N2$ = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน, N
 S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, mL
 $N1$ = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, N
 I = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน, mL

2.3 วิธีวิเคราะห์

2.3.1 บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 325 เมช

2.3.2 อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 103 - 105 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 3 h แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

2.3.3 ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 cm³ ที่มีฝาปิด (ชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง 3 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นของไอโอดีนหลังการดูดซับน้อยกว่าเท่ากับหรือ มากกว่า 0.02 N)

2.3.4 เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 cm³ แก้วขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 s เพื่อกำจัดเถ้า และซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

2.3.5 เติมสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.1000 ± 0.001 N 100 cm³ ปิดฝาแก้วแรงๆ 30 s

2.3.6 กรองแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรองวัดต์แมน (Whatman) เบอร์ 42

2.3.7 ปล่อยให้สารละลาย 50 cm³ ไส้ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 cm³

2.3.8 ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 N จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนหยดน้ำ แป้ง 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ไทเทรตต่อกระทั่งสารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ (S)

2.3.9 คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ (C) โดย

$$C = NI / (50 \times S) \quad (ก11)$$

2.3.10 คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมถ่าน (X/M) จาก

$$X/M \text{ (mg/g)} = (A - [DF \times B \times S]) / M \quad (ก12)$$

เมื่อ $A = 12693N2$

$B = 126.93N1$

DF = dilution factor

For example, if 25 mL of HCl and 50 mL of filtrate are used:

$$DF = (100+25)/50 = 2.5$$

2.3.11 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัม
ถ่านกับความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับจะได้กราฟเป็นเส้นตรง

2.3.12 คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ตรง
ตำแหน่งที่ค่าความเข้มข้นสารละลายไอโอดีนที่เหลือเท่ากับ 0.02 N



ประวัติผู้เขียน

นางสาวสาวิตรี ประภาการ เกิดเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2526 ณ อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี เป็นบุตรของนายประชุม คำหอม และ นางเบียบ คำหอม สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษา โรงเรียนวัดบ้านสระ ตำบลบ้านสระ อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสามชุกรัตนโกศาราม ตำบลสามชุก อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ในปี พ.ศ. 2548 สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และ ปี พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการดังนี้

1) สาวิตรี คำหอม และ วีรชัย อัจหาญ. (2551). การศึกษาผลกระทบของสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลต่อค่าความร้อน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 192 - 193

2) สาวิตรี คำหอม, วีรชัย อัจหาญ และชาญชัย ทองโสภณ. (2552). การศึกษาการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟแบบสายพานในกระบวนการนึ่งปาล์มน้ำมัน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 10 ประจำปี 2552, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 36 - 41.

3) พินิจ จิรกุล, วีรชัย อัจหาญ, สุภัทร หนูแย้ม และสาวิตรี คำหอม. (2552). การศึกษาต้นทุนการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลไม้เชิงพาณิชย์. การประชุมวิชาการครั้งที่ 10 ประจำปี 2552, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 380 - 385.