

ผลของแกมมาอะลูมินาต่อคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มน้ำมัน

นางสาวอัญรัตน์ กั่นดอก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF γ -Al₂O₃ ON CARBONIZATION OF OIL PALM SHELL

Miss Unyarat Kandok

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของแกมมาอะลูมินาต่อคาร์บอนในเซชันกะลา ปาล์มน้ำมัน
โดย	นางสาวอัญรัตน์ กันตอก
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกื้อวลี พฤษชาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นคร วรสุวรรณรักษ์)

(EFFECTS OF γ - Al_2O_3 ON CARBONIZATION OF OIL PALM SHELL)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:

ผศ.ดร. ประพันธ์ คุชฌารา, 88 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาคาร์บอนไนเซชันกะลาปาล์มน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยทำการศึกษาผลของปัจจัยดำเนินการ ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์ม และการนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ใหม่ พบว่า คาร์บอนไนเซชันกะลาปาล์มที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 1 ให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และร้อยละผลได้ของคาร์บอนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 41.40 และ 81.97 ตามลำดับ คิดเป็นค่าการนำกลับคาร์บอนที่สูญเสียไปกับการปลดปล่อยสารระเหยระหว่างคาร์บอนไนเซชันกะลาปาล์มร้อยละ 21.93 เนื่องจากการใช้แกมมาอะลูมินาเป็นวัสดุเบดร่วมในคาร์บอนไนเซชันสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการรีพอลิเมอไรเซชัน และการเกิดโค้กของสารระเหยระหว่างการสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์ม นอกจากนี้ศึกษาการนำวัสดุเบดกลับมาใช้ใหม่ พบว่าแกมมาอะลูมินาสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ เมื่อผ่านการเผา ภายใต้บรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และร้อยละผลได้ของคาร์บอน เท่ากับ 41.04 และ 80.69 ตามลำดับ ซึ่งให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้แกมมาอะลูมินาก่อนใช้งาน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าถ่านชาร์และโค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับเชื้อเพลิงอื่นได้ โดยมีพลังงานความร้อนเท่ากับ 7,089.47 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมถ่านชาร์ และ 435.51 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมอะลูมินาตามลำดับ

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2556.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5372391923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : OIL PALM SHELL / CARBONIZATION / GAMMA ALUMINA / CHAR

UNYARAT KANDOK : EFFECTS OF γ -Al₂O₃ ON CARBONIZATION OF OIL PALM SHELL. ADVISOR : ASST. PROF. SIRILUX POOMPRADUB, Ph.D., CO-ADVISOR : ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 88 pp.

In this work, the carbonization of oil palm shell (OPS) in fixed-bed reactor under atmosphere pressure was studied. The process parameters such as heating rate, temperature, weight ratio of γ -alumina (Al₂O₃) to OPS and regeneration of γ -Al₂O₃ were investigated. The char yield and carbon yield of the carbonization of OPS at 400°C, heating rate of 10°C/min and the weight of ratio of γ -Al₂O₃ to OPS of 1:1 were 41.40 wt.% and 81.97 wt.%, respectively. This result was referred that the carbonization of OPS with γ -Al₂O₃ could recover 21.93 %wt of carbon element because the use of γ -Al₂O₃ as a bed material in a carbonization could promote the re-polymerization and coke formation during the thermal degradation of OPS. The regeneration of bed material was also studied. It was found that the use of regenerated γ -Al₂O₃ at 800°C for 1 hour under air resulted the char yield and carbon yield of 41.04 wt.% and 80.69 wt.%, respectively. Accordingly, the efficiency of γ -Al₂O₃ before and after regeneration was comparable. From this result, it can be concluded that char and coke on the surface of γ -Al₂O₃ can be used as an energy source with other fuels. The heating value of char and coke were about 7,089.47 kcal/kg char and 435.51 kcal/kg Al₂O₃, respectively.

Department : Chemical Technology Student's Signature

Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2013 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้คำแนะนำ และความเอาใจใส่ในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่คอยให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณกลุ่มภารกิจสนับสนุนบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต ครั้งที่ 3 ประจำปีงบประมาณ 2555 เพื่อสนับสนุนการวิจัย

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.แก้วดี พฤษชาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นคร วรสุวรรณรักษ์ ที่กรุณามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกและในการใช้ห้องปฏิบัติการและในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุน ตลอดจนจบการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ชีวมวล.....	5
2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล.....	6
2.2 ปาล์มน้ำมัน.....	8
2.3 กระบวนการไพโรไลซิส.....	10
2.3.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส.....	12
2.3.2 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	13
2.4 คาร์บอนในเซชัน.....	14
2.4.1 กระบวนการผลิตถ่านชาร์.....	14
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชาร์ที่ได้.....	15
2.5 คุณภาพและการใช้ประโยชน์ของถ่าน.....	17
2.5.1 คุณภาพถ่าน.....	17

	หน้า
2.5.2 การใช้ประโยชน์ของถ่าน.....	18
2.6 อะลูมินา.....	19
2.7 การดูดซับ.....	21
2.7.1 กลไกการดูดซับ.....	22
2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	28
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	28
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา.....	29
3.3.2 คาร์บอนในเซชัน.....	30
3.3.3 การคำนวณร้อยละผลได้ของถ่านชาร์.....	31
3.3.4 คาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมา อะลูมินา.....	31
3.3.5 การคำนวณร้อยละผลได้ของคาร์บอน.....	33
3.3.6 การวิเคราะห์แบบประมาณ.....	33
3.3.6.1 การหาปริมาณความชื้น.....	33
3.3.6.2 การหาปริมาณเถ้า.....	34
3.3.6.3 การหาปริมาณสารระเหย.....	35
3.3.6.4 การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว.....	35
3.3.7 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	36
3.3.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	36
3.3.9 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน.....	37

	หน้า
	37
	37
	38
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	39
4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาปาล์ม.....	39
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของกะลาปาล์ม.....	39
4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์ม ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA).....	41
4.2 คาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม.....	42
4.2.1 ผลของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่อร้อยละ ผลได้ของถ่านชาร์.....	42
4.2.2 ผลของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่อสมบัติ ของถ่านชาร์.....	44
4.2.3 ผลของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่อลักษณะ พื้นผิวของถ่านชาร์.....	51
4.3 ผลของแกมมาอะลูมินาต่อคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม.....	54
4.4 การนำกลับพลังงาน (Energy recovery) ในคาร์บอนในเซชันร่วม ระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา.....	61
4.5 การนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำในคาร์บอนในเซชันร่วม ระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67

	หน้า
5.2 ข้อเสนอนี้.....	69
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	76
ภาคผนวก ข เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ.....	82
ภาคผนวก ค การหาความเข้มข้นของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด.....	84
ภาคผนวก ง ลักษณะทางกายภาพของแกมมาอะลูมินาหลังจากผ่าน คาร์บอนไนเซชันร่วมกับกะลาปาล์ม.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลผลิตปาล์มน้ำมันในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2552 - 2554.....	9
4.1	การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของกะลาปาล์ม.....	40
4.2	ค่าความร้อนของถ่านหินศักดิ์ต่าง ๆ.....	40
4.3	การวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันภายใต้ อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 350 400 และ 450 องศาเซลเซียสอัตราการให้ ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	46
4.4	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์ บอนในเซชันภายใต้อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 350 400 และ 450 องศา เซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที	48
4.5	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้จากการ คาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา อัตราการ ให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในคาร์บอนในเซชัน 30 นาที.....	60
4.6	ค่าพลังงานความร้อน (Heating value) ที่ได้จากการเผาไค้กบนพื้นผิว ของแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันร่วมกับกะลาปาล์มที่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400 องศา เซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	62

ตารางที่		หน้า
4.7	การนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์คาร์บอน และโค้ก ตามลำดับ จากการคาร์บอนไอเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 1:1 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที.....	65
ก1	ศักดิ์ของถ่านหิน.....	79
ค1	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard, STD).....	84
ค2	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละจุด.....	85

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของเซลล์ลูโลส.....	7
2.2	โครงสร้างของน้ำตาลในเฮมิเซลล์ลูโลส.....	7
2.3	โครงสร้างของลิกนิน.....	8
2.4	แผนภาพกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากปาล์มน้ำมัน.....	9
2.5	กลไกการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล.....	11
2.6	แผนภาพ Van Krevlan.....	19
2.7	เส้นทางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะลูมินา.....	20
2.8	การรีไฮเดรตและรีไฮดรอกซิเลทของน้ำบนพื้นผิวอะลูมินา.....	21
2.9	กลไกของการดูดซับ.....	23
3.1	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับคาร์บอนในเซชัน.....	32
4.1	การสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์ม ภายใต้บรรยากาศของแก๊ส ไนโตรเจน ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	42
4.2	ผลของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนในคาร์บอนในเซชันต่อร้อยละ ผลได้ของถ่านชาร์.....	43
4.3	อัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนอะตอม ออกซิเจนต่อคาร์บอนของถ่านหินแอนทราไซต์ ถ่านหินปิทูมินัส ถ่านหิน ลิกไนท์ และถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนในเซชันที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในคาร์บอนในเซชัน 30 นาที อุณหภูมิ 350 400 และ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับ.....	49

รูปที่	หน้า	
4.4	ลักษณะพื้นผิวของ (ก) กะลาปาล์ม (ข) ถ่านชาร์จากคาร์บอนในเซชันที่ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิ 350 องศา เซลเซียส (ค) ถ่านชาร์จากคาร์บอนในเซชันที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (ง) ถ่านชาร์จาก คาร์บอนในเซชันที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส.....	52
4.5	ลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์จากคาร์บอนในเซชันอุณหภูมิ 450 องศา เซลเซียส (ก) อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที (ข) อัตรา การให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที (ค) อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที.....	53
4.6	ผลของแกมมาอะลูมินาต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์.....	54
4.7	ผลของแกมมาอะลูมินาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอนในเซ ชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 400 องศา เซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที.....	56
4.8	ผลของแกมมาอะลูมินาต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ ร้อยละผลได้ของ คาร์บอน และร้อยละผลได้ของโค้ก (ก) อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 450 องศาเซลเซียส.....	58
4.9	แสดงร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และร้อยละของพลังงานที่ได้จากถ่าน ชาร์เมื่อผ่านคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มด้วยอุณหภูมิ 400 องศา เซลเซียส เมื่อไม่ใช้แกมมาอะลูมินาและใช้แกมมาอะลูมินาที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักต่าง.....	62

รูปที่		หน้า
4.10	พฤติกรรมกาเหาะใหม่ของไค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินา ภายใต้บรรยากาศของแก๊สออกซิเจน ด้วยอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที...	63
4.11	การนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ จากคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 1:1 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	66
ง1	แกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันร่วมกับกะลาปาล์มที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์ม (ก) อัตราส่วน 0.5:1.0 (ข) อัตราส่วน 1.0:1.0 (ค) อัตราส่วน 1.5:1.0 (ง) อัตราส่วน 2.0:1.0 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเศรษฐกิจมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากร ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิต ส่งผลให้ความต้องการในการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น พลังงานที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด ทุกประเทศทั่วโลกจึงตระหนักถึงปัญหาวิกฤติพลังงานและพยายามที่จะคิดค้นวิจัยหาแหล่งพลังงานทางเลือกกันอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานชีวมวล ฯลฯ (Brunn และคณะ, 2011)

พลังงานชีวมวลเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงทางเลือกที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากชีวมวลเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ของเหลือจากป่าไม้ ตลอดจนของเสียจากสัตว์ ที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Neves และคณะ, 2011) ซึ่งมีปริมาณมากในประเทศไทยและเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงยังช่วยลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะเรือนกระจก เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลสามารถหมุนเวียนไปใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืชได้ ปาล์มน้ำมันถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย โดยปาล์มน้ำมันถูกใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มและน้ำมันไบโอดีเซล ในอุตสาหกรรมดังกล่าวมักเกิดของเสียจากกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นทะลายปาล์ม เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์มซึ่งเป็นแหล่งชีวมวลจำนวนมาก ของเสียดังกล่าวได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ต่อ เช่น ทะลายปาล์มและเส้นใยปาล์มจะถูกนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพของดิน เนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบมากสามารถย่อยสลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ในดิน ส่วนกะลาปาล์มถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนการใช้ถ่านหินที่มีราคาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงมีปัญหาด้านคุณภาพพลังงานเมื่อ

เปรียบเทียบกับการใช้ถ่านหินและน้ำมันเตา เนื่องจากกะลาปาล์มมีค่าความร้อนต่ำ ความหนาแน่นต่ำ และมีปริมาณความชื้นมาก (นคร ทิพย์วงศ์, 2553) ดังนั้นการลดปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการแปรรูปชีวมวลให้กลายเป็นเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) กระบวนการไพโรไลซิส คือกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลในภาวะจำกัดอากาศให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้เรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งโดยตรงหรือใช้เป็นวัสดุดูดซับในทางอุตสาหกรรมได้ หากต้องการผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสให้อยู่ในรูปของแข็งในปริมาณมากที่สุดจะเรียกกระบวนการนี้ว่า คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) แต่คาร์บอนไนเซชันภายใต้ความดันบรรยากาศนั้นให้ผลได้ของถ่านชาร์ประมาณ 30-40% เท่านั้น (Elyounssi และคณะ, 2010) แม้ว่าจะงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการเพิ่มผลได้ของถ่านชาร์ในคาร์บอนไนเซชันโดยการเพิ่มความดันให้สูงขึ้น (Inagaki และคณะ, 2010) แต่อย่างไรก็ตามคาร์บอนไนเซชันที่ความดันสูงจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูงขึ้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ต้องมีความแข็งแรง และทนทานต่อความดันที่อัดเข้าไปในระหว่างกระบวนการ นอกจากนี้ในระหว่างคาร์บอนไนเซชันมีการปลดปล่อยสารระเหยที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานไปบางส่วน และยังไม่มียานวิจัยใดที่นำวัสดุเบดมาทำคาร์บอนไนเซชันร่วมกับชีวมวลเพื่อเป็นการศึกษาการเพิ่มผลได้ของถ่านชาร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของแกมมาอะลูมินาต่อคาร์บอนไนเซชันของกะลาปาล์ม น้ำมันภายใต้บรรยากาศปกติ เพื่อให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของถ่านชาร์ที่มากขึ้น และถ่านชาร์ที่ผลิตได้มีคุณภาพพลังงานที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าถ่านหิน รวมทั้งสามารถนำกลับคาร์บอนที่สูญเสียไปกับสารระเหยกลับมาได้มากขึ้น

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตถ่านชาร์จากกะลาปาล์มโดยคาร์บอนไนเซชันภายใต้บรรยากาศปกติ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และคาร์บอนไนเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่มีผลต่อผลได้ผลิตภัณฑ์ (yield) สมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่านชีวมวล รวมถึงการนำธาตุคาร์บอนที่สูญเสียไปในคาร์บอนไนเซชันกลับมา

1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนในเซชัน
- 1.3.2 จัดหากะลาปาล์ม แกมมาอะลูมินา และเตรียมเครื่องปฏิกรณ์สำหรับคาร์บอนในเซชัน
- 1.3.3 ล้าง บดย่อยและคัดขนาดกะลาปาล์ม ให้มีขนาด 1.0 - 2.0 มิลลิเมตร อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในคาร์บอนในเซชัน
- 1.3.4 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชีวมวล
 - 1.3.4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis ASTM D3172, D3173, D3174, D3175) ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว
 - 1.3.4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน โดยเครื่อง CHN analyzer
 - 1.3.4.3 ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของกะลาปาล์มด้วยเทคนิค Thermal gravimetric/Differential Thermal Analyzer (TG/DTA)
 - 1.3.4.4 วิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value) ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter
- 1.3.5 ศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ ได้แก่
 - 1.3.5.1 อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน (องศาเซลเซียส) : 350, 400, 450
 - 1.3.5.2 อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที) : 5, 10, 15
- 1.3.6 ศึกษาคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มกับแกมมาอะลูมินา โดยศึกษาผลของปัจจัยได้แก่
 - 1.3.6.1 อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน (องศาเซลเซียส) : 400, 450
 - 1.3.6.2 อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที) : 5, 10, 15
 - 1.3.6.3 อัตราส่วนโดยมวลระหว่างกะลาปาล์มกับแกมมาอะลูมินา (กรัม: กรัม) : 1.0:0.5, 1.0:1.0, 1.0:1.5, 1.0:2.0

- 1.3.6.4 คุณหมุมิในการเผาเพื่อนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ใหม่
(องศาเซลเซียส) : 700, 800, 900
- 1.3.7 วิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชัน
 - 1.3.7.1 ผลได้ผลิตภัณฑ์ (Yield)
 - 1.3.7.2 ค่าความร้อน ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter
 - 1.3.7.3 วิเคราะห์แบบประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย ถ้ำ และคาร์บอนคงตัว
 - 1.3.7.4 วิเคราะห์แบบแยกธาตุ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ด้วยเครื่อง CHN elemental analyzer
- 1.3.8 วิเคราะห์การนำพลังงานกลับมาจากการนำกลับแกมมาอะลูมินา
- 1.3.9 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เชื้อเพลิงแข็งมีปริมาณและคุณภาพทางเชื้อเพลิง โดยกระบวนการคาร์บอนในเซชัน และสามารถนำกลับคาร์บอนและพลังงานที่สูญเสียไปกับสารระเหย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (Biomass) (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

ชีวมวล หมายถึง สสารที่ได้จากพืช สัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ รวมไปถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มูลสัตว์ และของเสียจากชุมชนที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งมาจากการสังเคราะห์แสงและเกิดการหมุนเวียนของพลังงานในธรรมชาติ ชีวมวลสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้

ชีวมวลที่ได้จากพืชนั้นถ้าแบ่งตามแหล่งที่มา ได้ดังนี้

1. ชีวมวลที่หาได้ตามโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตรชีวมวลชนิดนี้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมทั่วไปเนื่องจากรวบรวมง่าย เช่น แกลบ ปีกไม้ เศษไม้ ชี้เลื่อย ใยปาล์ม ทะลายปาล์มและกะลาปาล์ม ชังข้าวโพด ชานอ้อย เปลือกมันสำปะหลัง
2. ชีวมวลที่หาได้จากตามไร่ สวน และนาข้าว เช่น ฟางข้าว ปลายไม้ รากไม้ เหง้ามันสำปะหลัง ทางปาล์ม เป็นต้น การนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้งานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและรวบรวมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ราคาต่อหน่วยสูงกว่าชีวมวลประเภทแรก จึงถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่น้อยมาก ดังนั้นส่วนใหญ่ถูกเผาทิ้งทุกปี
3. ชีวมวลที่ปลูกใหม่เพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะ เช่น การปลูกไม้โตเร็วเพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า

มนุษย์รู้จักนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานตั้งแต่สมัยโบราณ การใช้พลังงานจากชีวมวลมีข้อดีหลายประการ เช่น พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานสะอาดเนื่องจากการเผาไหม้ชีวมวลก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะเรือนกระจกเหมือนกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ชีวมวลจะถูกหมุนเวียนไปใช้โดยพืชชีวมวลเองเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง นอกจากนี้ชีวมวลมีปริมาณกำมะถันน้อย ดังนั้นการนำ

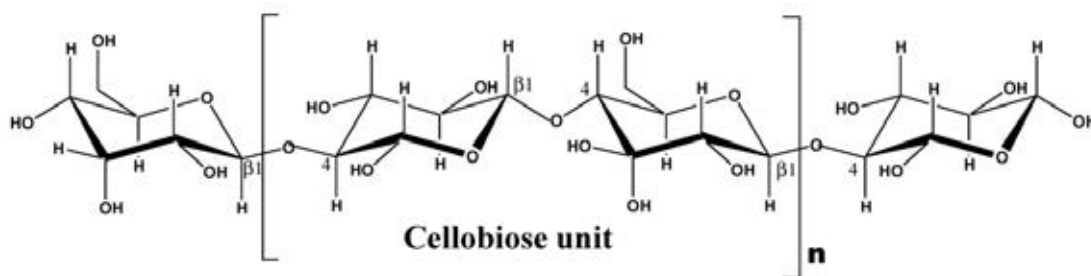
ชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต้นตอของการเกิดภาวะฝนกรด แต่การนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงก็มีข้อเสีย คือ ชีวมวลมีปริมาณไม่แน่นอนหากนำมาใช้เป็นพลังงานโดยตรงอาจก่อให้เกิดภาวะขาดแคลนพลังงาน ชีวมวลมีความชื้นสูง จึงทำให้มีค่าความร้อนต่ำและเป็นอุปสรรคในการเก็บรักษา นอกจากนี้ ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นต่ำ ทำให้เกิดอุปสรรคในการขนส่งและการจัดเก็บ

2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล (Cheng, 2010; Mohan และคณะ, 2006)

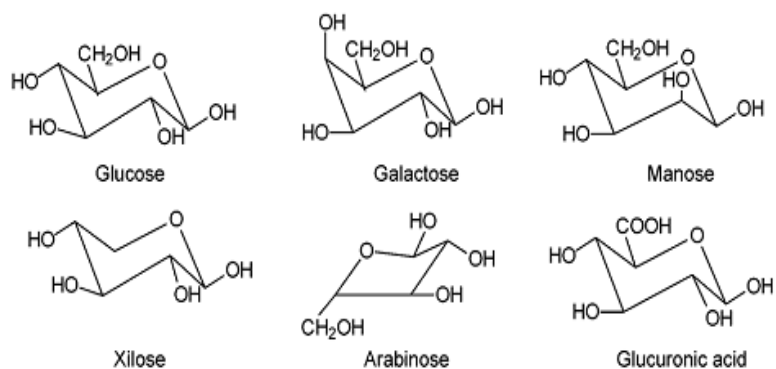
ชีวมวลเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocelluloses material) ที่เกิดจากสารประกอบโมเลกุลใหญ่จำพวก เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน มาประกอบกัน ลิกโนเซลลูโลสสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย ตามชนิดของโมเลกุลน้ำตาล ได้แก่ โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) และลิกนิน โฮโลเซลลูโลสเกิดจากการรวมกลุ่มกันของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่วนลิกนินนั้นเกิดจากการต่อข้ามเชื่อมกันของกลุ่มพอลิเมออร์สามมิติ

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมออร์สายยาวที่มีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบตาประมาณ 10,000 หน่วย เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นใยเล็กๆ ที่เรียกว่าไฟบริล (Fibril) ซึ่งมีลักษณะเป็นมัดยาวรวมกันอยู่อย่างแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ภายในโมเลกุล ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและแข็งแรงมาก โครงสร้างเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.1

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิเมออร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ มีโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม ได้แก่ น้ำตาลไซโลส อะราบิโนส กลูโคส แมนโทส และกาแลกโทส องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา ทำให้พันธะไม่แข็งแรง จึงถูกทำลายได้ง่าย โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.2

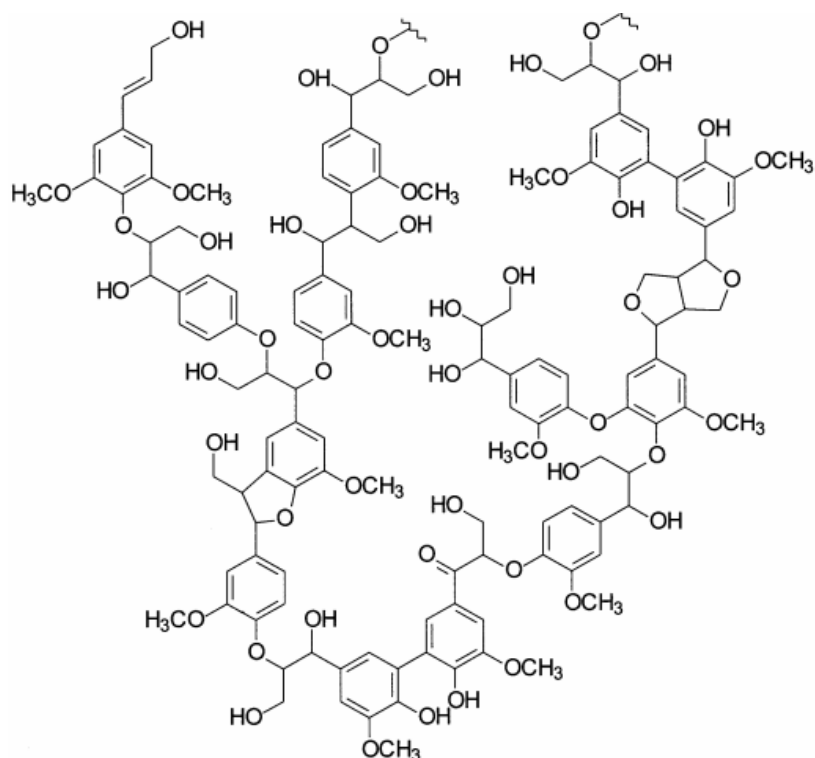


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส (Mohan และคณะ, 2006)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของน้ำตาลในเฮมิเซลลูโลส (Mohan และคณะ, 2006)

ลิกนิน (Lignin) ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์ของพืช ที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นสารประกอบแอโรแมติก (Aromatic) ที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้างสามมิติ ทำให้โครงสร้างของลิกนินมีโมเลกุลขนาดใหญ่และจัดเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ยากต่อการสลายตัวทางความร้อน โครงสร้างลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของลิกนิน (Dorrestijn และคณะ, 2000)

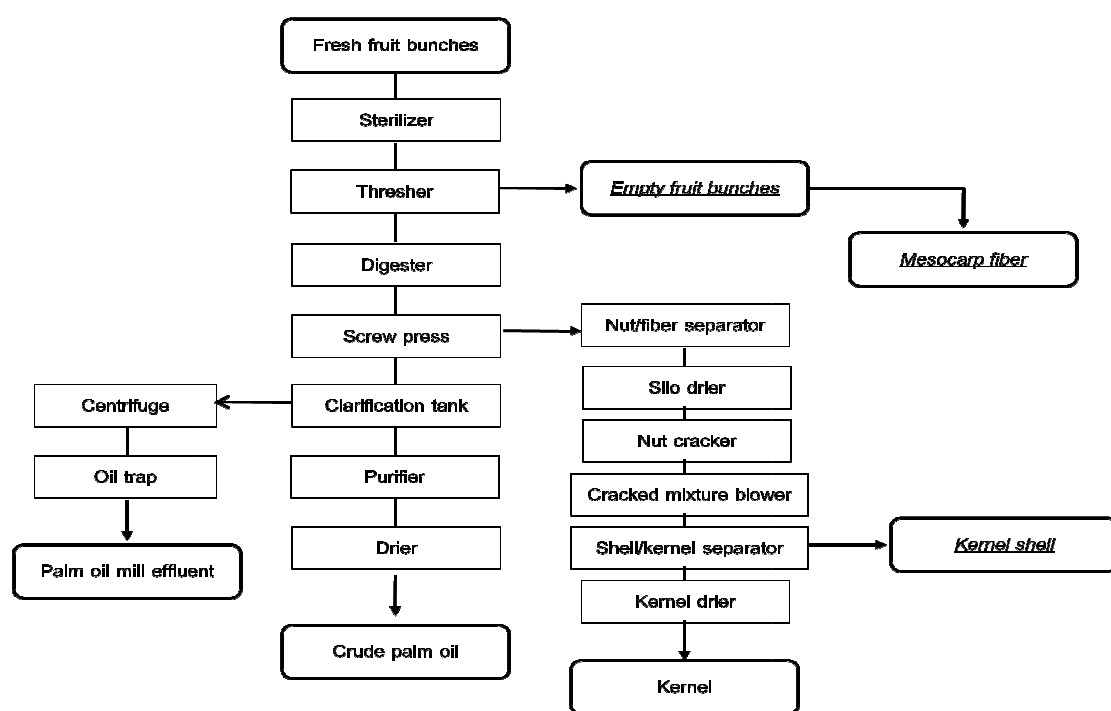
2.2 ปาล์มน้ำมัน (Oil palm)

ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของไทย ปาล์มน้ำมันไม่ได้เป็นพืชดั้งเดิมของประเทศไทย กิ่งพันธุ์ถูกนำเข้ามาจากต่างประเทศเช่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย เป็นต้น ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 4.28 ล้านไร่ การผลิตปาล์มน้ำมันของไทยมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการที่ภาครัฐมีการผลักดันให้ขยายพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อเพิ่มผลผลิตปาล์มดิบเพื่อรองรับกับการขยายตัวของแหล่งพลังงานทดแทน และลดความเสี่ยงด้านความมั่นคงทางด้านอาหารของประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม จะเริ่มต้นจากการนำทะลายปาล์มสดมา ผ่านกรรมวิธีการแยกเอาน้ำมันปาล์มออกและก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือใช้ 3 ชนิด คือ ไยปาล์มกะลาปาล์ม และทะลายปาล์ม ดังแสดงดังรูปที่ 2.4 วัสดุเหลือใช้เหล่านี้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่นไยปาล์ม มีลักษณะ

ตารางที่ 2.1 ผลผลิตปาล์มน้ำมันในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2552-2554

ปี พ.ศ.	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กก.)
2552	8,162,703	2,561
2553	8,223,169	2,315
2554	10,776,848	2,876

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

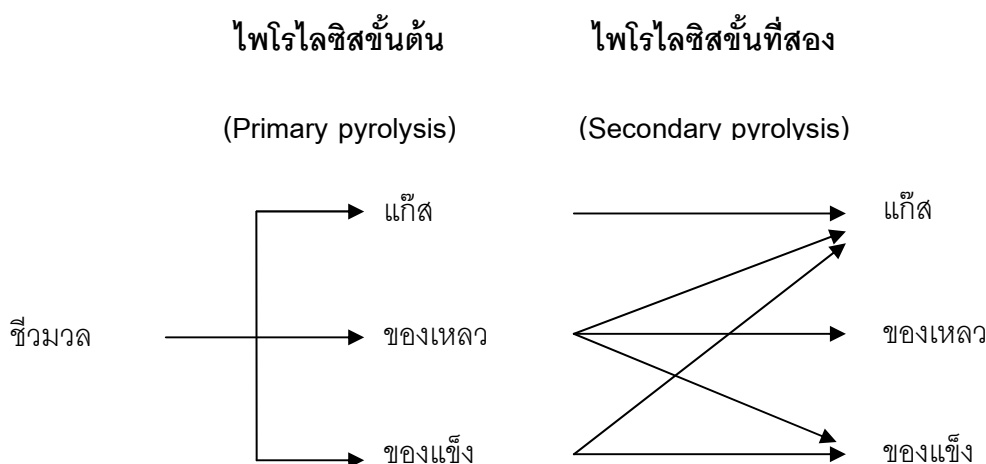


รูปที่ 2.4 แผนภาพกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากปาล์มน้ำมัน (Uemura และคณะ, 2011)

เป็นเส้นใย ถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม กะลาปาล์มมีลักษณะเป็นของแข็งขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร ความชื้นต่ำและมีค่าความร้อนค่อนข้างสูง จึงเป็นที่นิยมของโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ส่วนทะลายปาล์มถูกนำไปเป็นวัสดุในการเพาะเห็ดแทนขี้เลื่อย ทะลายปาล์มยังไม่เป็นที่นิยมนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงมากนักเนื่องจากภายในโครงสร้างของทะลายปาล์มมีสารแอลคาไลน์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก เมื่อนำไปเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ขี้เถ้าของทะลายปาล์มจะหลอมติดในผนังของเตาเผาซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง

2.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) (Neves และคณะ, 2011; นคร ทิพยาวงศ์, 2553; Varma และ Behera, 2003)

ไพโรไลซิส เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนภายใต้ภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนอย่างจำกัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้มีทั้งส่วนที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยส่วนที่เป็นของแข็งเรียกว่า ถ่านชาร์ ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุถ่านเป็นหลักและมีเถ้าอินทรีย์ผสมอยู่ด้วย ส่วนของเหลวที่ควบแน่นได้ที่อุณหภูมิต่ำ เรียกว่า ของเหลวไพโรไลกเนียส หรือน้ำมันไพโรไลซิส ลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำคล้ายน้ำมันดิบ บางครั้งเรียกว่า น้ำมันดิบชีวภาพ (bio-crude oil) กระบวนการไพโรไลซิสสามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์สถานะใดสถานะหนึ่งมากที่สุดได้ โดยการควบคุมปัจจัยที่สำคัญต่างๆของกระบวนการ เช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิสได้รับความสนใจไม่ใช่แค่กระบวนการที่ผลิตเชื้อเพลิง แต่ยังเป็นปฏิกิริยาขั้นกลางสำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการเผาไหม้



รูปที่ 2.5 กลไกการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล (Neves และคณะ, 2011)

กลไกและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส แสดงดังรูปที่ 2.5 สามารถสรุปได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 ชีวมวลได้รับความร้อนจากการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจึงมีการปลดปล่อยความชื้นออกมา จากนั้นเกิดการสลายตัวขั้นแรก (Primary pyrolysis) ปลดปล่อยสารระเหยซึ่งประกอบด้วย สารระเหยโมเลกุลใหญ่ที่สามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ เช่น น้ำมันทาร์ (Tar) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) สารระเหยโมเลกุลเล็กไม่สามารถควบแน่นได้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน เป็นต้น และเกิดผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง เรียกว่า ถ่านชาร์

ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นแรกเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องมีการปลดปล่อยสารระเหยอย่างต่อเนื่อง เมื่อสารระเหยร้อนไหลผ่านชีวมวลที่ยังอยู่ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกันและเกิดการควบแน่นของสารระเหยโมเลกุลใหญ่บางส่วน และตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองที่สามารถเปลี่ยนสารระเหยที่ควบแน่นได้ขั้นต้น ให้เป็นสารระเหยที่ควบแน่นไม่ได้ สารระเหยที่ควบแน่นได้ และเกิดการรวมตัวกันของสารระเหยดังกล่าวได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง นอกจากนี้ ถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นในการไพโรไลซิสขั้นแรกอาจแตกต้อกลายเป็นสารระเหยต่อไป

ขั้นที่ 3 การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองแบบเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเองไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น มีการแก่งแย่งสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาและในขณะเดียวกันอาจมีปฏิกิริยาอื่นๆ เกิดร่วมด้วย เช่น การรวมตัวของสารอนุมูล ปฏิกิริยาไล่น้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และความดันในปฏิกิริยา

2.3.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส (นคร ทิพยาวงศ์, 2553; Mohan และคณะ, 2006)

กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ การไพโรไลซิสแบบช้า และการไพโรไลซิสแบบเร็ว ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

1. การไพโรไลซิสแบบช้าหรือแบบทั่วไป (Conventional or slow pyrolysis)

เป็นกระบวนการที่มนุษย์ใช้ในการผลิตถ่านชาร์มาอย่างช้านาน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวชีวมวลจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยจากการสลายตัวของชีวมวลจะอยู่ในปฏิกิริยาเป็นเวลานาน 5-30 นาที การที่สารระเหยไม่หลุดออกไปนอกปฏิกิริยาเร็วทำให้องค์ประกอบในสารระเหยยังคงเข้าทำปฏิกิริยากับชีวมวลได้อย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสทั้งสามสถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส หากมีการควบคุมกระบวนการให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและมีอัตราการให้ความร้อนที่ช้า จะส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งที่มากขึ้น

2. การไพโรไลซิสเร็ว (Fast pyrolysis)

เป็นกระบวนการที่ให้อัตราการให้ความร้อนที่สูง อุณหภูมิที่สูงและระยะเวลาที่สั้นแก่ชีวมวล เพื่อให้เกิดการสลายตัวโดยให้ผลิตภัณฑ์ทั้งสามสถานะแต่มีปริมาณของสารระเหยและของเหลวเป็นผลิตภัณฑ์หลัก มักควบคุมให้สารระเหยมีเวลาอยู่ในปฏิกิริยาต่ำกว่า 2 วินาที โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจะได้น้ำมันชีวภาพประมาณร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ร้อยละ 15-25 โดย

น้ำหนัก และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล

2.3.2 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส

ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส เชื้อเพลิงชีวมวลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งมีสมบัติดังนี้

1. ถ่านชาร์ (Char) เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขั้นปฐมภูมิ (Primary reaction) และขั้นทุติยภูมิ (Secondary reaction) ของชีวมวล มีส่วนประกอบของคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนใหญ่ สารระเหยประมาณ 20-30% และเศษเถ้าอยู่ในช่วง 0.5-5% สมบัติของถ่านชาร์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและขั้นตอนในการไพโรไลซิส ถ่านชาร์ที่ดีควรมีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่ยุ่ย มีสีดำมันเงา น้ำหนักเบา สามารถลอยน้ำได้ เผาไหม้ให้อุณหภูมิสูง ไร้วาง จึงนิยมนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งชั้นดี เพื่อให้ความร้อนระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้สามารถเพิ่มมูลค่าของได้โดยนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านชาร์มีความพรุนในตัว ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวลมาก
2. กรดไพโรลิกเนียส (Pyrolygneous acid) เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดจากการไพโรไลซิส กรดไพโรลิกเนียสประกอบด้วย น้ำส้มควันไม้ และน้ำมันทาร์ น้ำส้มควันไม้เป็นของเหลวสีเหลืองปนน้ำตาล มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 3 น้ำส้มควันไม้มีองค์ประกอบของเมทานอล กรดอะซิติก และกรดอินทรีย์อีกหลายชนิด น้ำส้มควันไม้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายเช่น ใช้ฉีดเพื่อป้องกันจุลินทรีย์ที่ทำลายพืช ใช้เป็นสารระงับกลิ่น ใช้พ่นเพื่อให้พืชออกผลและโตเร็วขึ้น เป็นต้น น้ำมันทาร์เป็นของเหลวอินทรีย์สีน้ำตาลดำ มีสารประกอบที่มีออกซิเจนอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก น้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายได้ในน้ำ เมทานอล และเอทานอล แต่ไม่ละลายในน้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำมันชีวภาพสามารถกักเก็บได้ บ่มส่งได้ และสามารถใช้ในการเผาไหม้ได้คล้ายกับน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันชีวภาพเป็น

สารเคมีที่ไม่เสถียร มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติตามเวลา เช่น ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น อาจจะมีการแยกชั้น ความสามารถในการระเหยน้อยลง และมีการฝังตัวของยางเหนียว เป็นต้น ความไม่เสถียรจะเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง ในการใช้งานจึงต้องกักเก็บที่อุณหภูมิต่ำ

3. สารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน ไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ และไอน้ำ เมื่อนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง จะได้ค่าพลังงานความร้อนที่ต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้

2.4 คาร์บอนในเซชัน (นคร ทิพยาวงศ์, 2553; อลิสรฯ นิติวัฒน์, 2553)

คาร์บอนในเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ารูปแบบหนึ่งที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของของแข็ง หรือที่เรียกว่า ถ่านชาร์ มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊ส ปฏิริยาคาร์บอนในเซชันต้องการความร้อนโดยตรงและทางอ้อม เพื่อทำให้เกิดปฏิริยาออกซิเดชันบางส่วน โดยทั่วไปอุณหภูมิในคาร์บอนในเซชันจะอยู่ในช่วง 200-500 องศาเซลเซียส

2.4.1 กระบวนการผลิตถ่านชาร์

การผลิตถ่านชาร์สามารถทำได้หลายวิธี แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ในทางปฏิบัติเมื่อถ่านชาร์ถูกผลิตในเตาเผา ขั้นตอนเหล่านี้จะคาบเกี่ยวและเกิดขึ้นพร้อมกันได้

ขั้นตอนที่ 1 ก่อนที่ชีวมวลจะกลายเป็นถ่าน ต้องไล่ความชื้นในเนื้อชีวมวลออกมาก่อนซึ่งสามารถทำได้ 2 ขั้นตอน คือ การขับน้ำที่อยู่ในรูปของน้ำอิสระ (free water) ออกมา เมื่อไล่น้ำอิสระในเนื้อชีวมวลออกหมดแล้ว จากนั้นกระบวนการดังกล่าวจะถูกเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำที่ยึดติดหรือดูด

ชั้นบนพื้นผิวของชีวมวลจะถูกปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่อง กระบวนการไถ่น้ำจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อมีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิของชีวมวลจะสูงขึ้นจนอยู่ในช่วง 200-270 องศาเซลเซียส เกิดกระบวนการแตกตัวทางความร้อนของชีวมวล โดยเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ส่งผลให้เกิดการปล่อยสารเคมีออกมามากมาย เรียกว่า ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแก๊สหรือไอ จึงรวมกันเรียกว่า สารระเหย ที่ประกอบไปด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำส้มควันไม้

ขั้นตอนที่ 3 ชีวมวลได้รับความร้อนและปลดปล่อยสารระเหยอย่างต่อเนื่อง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของแข็งที่เรียกว่า ถ่านชาร์ ลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของชีวมวลเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 270 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป เป็นสาเหตุให้ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้ลดลง

ขั้นตอนที่ 4 การทำให้ถ่านชาร์มีความบริสุทธิ์ คือ การให้ความร้อนกับถ่านชาร์จนถึงอุณหภูมิประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดน้ำมันทาร์ที่ตกค้างอยู่ในถ่านชาร์ เนื่องจากน้ำมันทาร์สามารถเกิดเป็นสารประกอบเบนโซไพเรน (Benzopyrene) และไดเบนซานทราเซน (Dibenzanthracene) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชาร์ที่ได้ (นคร ทิพยาวงศ์, 2553; นฤมล ชูบัวทอง, 2550)

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของถ่านที่ได้จากวิธีการผลิตหนึ่งๆ มีหลายประการ แต่มีปัจจัยที่สำคัญดังนี้

1. อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน (Temperature) มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของถ่านชาร์ เมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้นปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะมี

ปริมาณลดลง เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานในการทำลายพันธะภายในของชีวมวลทำให้ชีวมวลมีการปลดปล่อยสารระเหยในปริมาณที่มาก แต่ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ถ่านชาร์ที่เพิ่มขึ้นจะมีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบทำให้ปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่านชาร์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น

2. อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากคาร์บอนในเซชัน ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงชีวมวลจะปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว ผลคือทำให้ได้ปริมาณถ่านชาร์ที่น้อยและถ่านชาร์ที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่และมีการทำลายโครงสร้างของรูพรุน

3. ขนาดของอนุภาค (Particle size) มีผลต่อปริมาณถ่านชาร์ที่ได้ เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการให้ความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การให้ความร้อนแก่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะช้ากว่าการให้ความร้อนแก่อนุภาคที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีการถ่ายโอนความร้อนที่เร็วและมีการกระจายของความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กจึงมีการปลดปล่อยสารระเหยที่มากกว่าและเหลือผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ที่น้อยลง

4. ความดัน (Pressure) มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์สารระเหย กล่าวคือ ที่ความดันต่ำจะทำให้มีปริมาณสารระเหยที่ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) เกิดขึ้นได้ดีที่ความดันสูง ทำให้ชีวมวลสลายตัวเป็นแก๊สได้ลดลง ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันทาร์และถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น

5. เวลาของสารระเหยในเครื่องปฏิกรณ์ (Residence time) เวลาของไอสารระเหยมีผลต่อปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ กล่าวคือ ในระหว่างคาร์บอนในเซชัน ถ่านชาร์ที่เพิ่มขึ้นจะสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกโครงสร้างของน้ำมันทาร์ที่ปลดปล่อยมากับสารระเหยให้กลายเป็นของแข็งได้อีก นอกจากนี้สารระเหยที่ออกมาหากมีเวลามากพอก็จะมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ถ่านชาร์ในปริมาณที่มากขึ้น

2.5 คุณภาพและการใช้ประโยชน์ของถ่าน (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

คุณภาพของถ่านจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่าน และกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน โดยทั่วไปแล้วไม้เนื้อแข็งจะกลายเป็นถ่านไม้เนื้อแข็ง และไม่ประเภทเนื้ออ่อนจะกลายเป็นถ่านไม้เนื้ออ่อน การควบคุมอุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันก็มีผลต่อคุณภาพของถ่าน โดยถ่านที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส นั้นจะมีร้อยละของเนื้อถ่านสูง สำหรับคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ถ่านที่ได้ก็จะมีคุณสมบัติในทางกลับกัน

2.5.1 คุณภาพของถ่าน

ความแกร่งของถ่าน (Charcoal hardness) สามารถวัดได้จากการทดสอบความแกร่ง (Hardness tester) โดยทั่วไปความแกร่งของถ่านจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน สำหรับถ่านไม้เนื้อแข็งซึ่งคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะมีระดับความแกร่งอยู่ที่ประมาณ 5-6 แต่ในขณะที่ใช้ไม้ชนิดเดียวกันแต่ทำผ่านคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปเป็น 700 องศาเซลเซียส ระดับความแกร่งของถ่านจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 9-10

ระดับของคาร์บอนไนเซชัน (Level of carbonization) สามารถวัดได้จากปริมาณสารระเหย สำหรับถ่านที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณสารระเหยจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 20-25 แต่อุณหภูมิของคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้นถึงประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ปริมาณของสารระเหยในเนื้อถ่านจะเหลือเพียงร้อยละ 10 การทดสอบเพื่อวัดระดับของคาร์บอนไนเซชันสามารถทำได้โดยการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าซึ่งจะสามารถแสดงเป็นระดับขึ้นของคาร์บอนไนเซชันของถ่าน

ความถ่วงจำเพาะของถ่าน (Specific Gravity) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่าน และระดับของคาร์บอนไนเซชัน ความถ่วงจำเพาะโดยทั่วไปของถ่านจากไม้สนจะมีค่าอยู่ประมาณ 0.3-0.4 ในขณะที่ถ่านไม้เนื้อแข็ง จะมีค่าอยู่ประมาณ 0.5-0.8 พื้นที่ผิว

(Surface area) ขึ้นอยู่กับชนิดของไม้และคุณสมบัติของคาร์บอนในเซชัน แต่สำหรับค่าเฉลี่ย พื้นที่ผิวของถ่านจะอยู่ที่ประมาณ 300 ตารางเมตรต่อกรัม

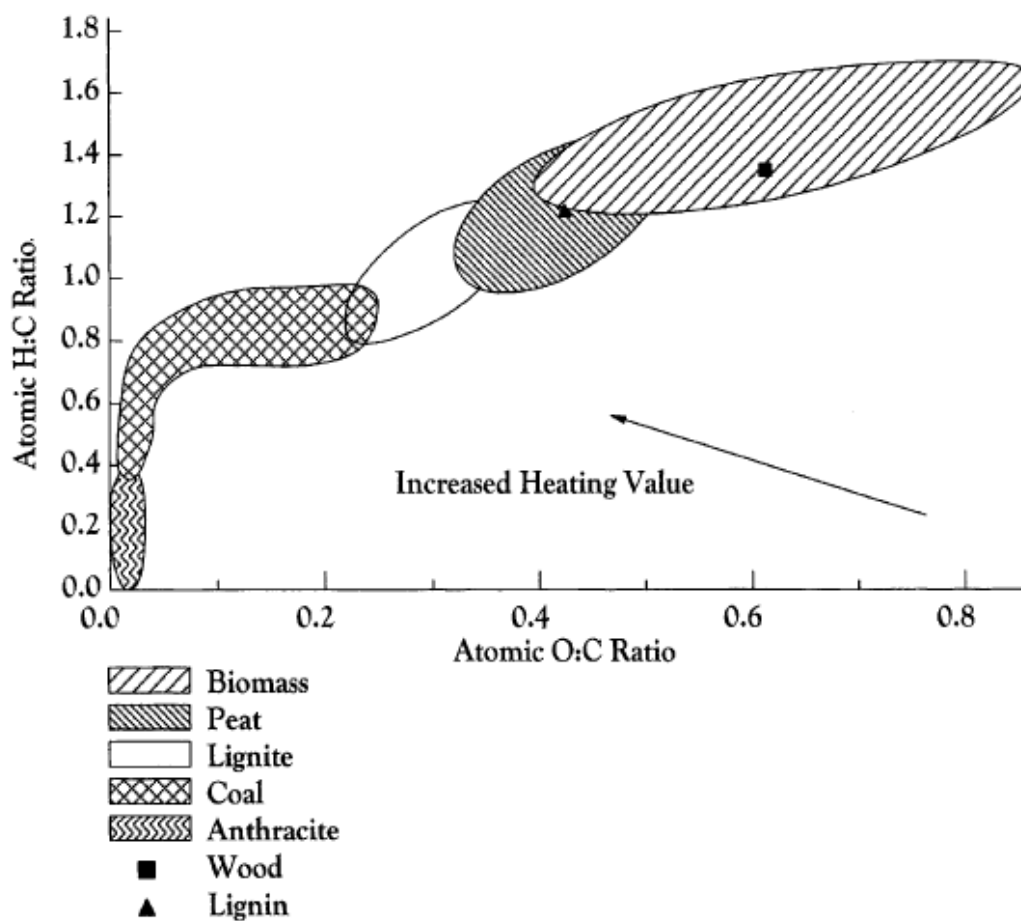
ค่าความเป็นกรดเบสของถ่าน (pH of char) ถ่านที่ผ่านคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิต่ำจะแสดงสภาพความเป็นกรดอย่างอ่อน แต่สำหรับถ่านที่ผ่านคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีสภาพความเป็นเบส โดยสภาพความเป็นกรดเบสของถ่านขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของส่วนประกอบธาตุในถ่าน โดยทั่วไปแล้วถ่านส่วนใหญ่จะมีสภาพความเป็นกรดเบสโดยมีค่า pH ประมาณ 8-9

2.5.2 การใช้ประโยชน์จากถ่าน

การใช้ประโยชน์ทางเชื้อเพลิงแข็งโดยตรง โดยตั้งแต่อดีตมนุษย์ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงในการถลุงเหล็ก นอกจากนั้นถ่านสามารถนำไปเป็นแหล่งความร้อนในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อทดแทนการใช้ถ่านหิน โดยการเปรียบเทียบสมบัติทางเชื้อเพลิงกับเชื้อเพลิงฟอสซิลมักใช้การเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนอะตอมระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนหรือที่รู้จักในรูปแบบแผนภาพ แวนเครฟแลน (Van Krevlan diagram) แสดงดังรูปที่ 2.6

การใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ผงถ่านจะนิยมถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงดิน ดูดซับสารเคมีทางการเกษตรและปุ๋ยเคมีส่วนเกินในดิน ป้องกันการเกิดโรคในสวนผลไม้ เพิ่มปริมาณแบคทีเรียในดิน และใช้ผสมกับอาหารเพื่อนำไปเลี้ยงสัตว์เพื่อรักษาโรคเกี่ยวกับอวัยวะในการย่อยอาหาร เป็นต้น

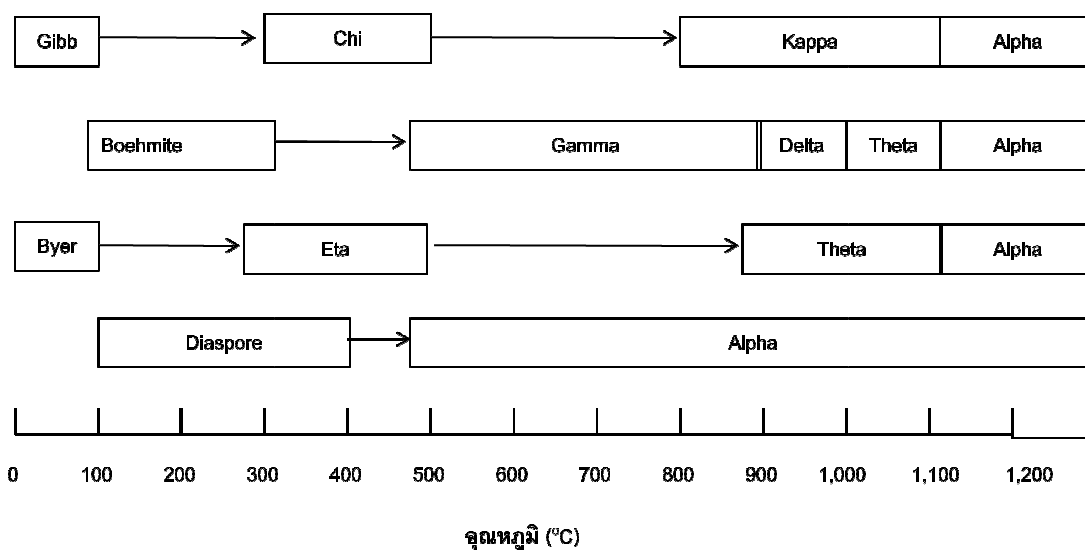
การใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดของเสีย โดยถ่านมีความสามารถในการดูดซับอนุภาคขนาดเล็ก รวมทั้งสามารถดูดกลิ่นได้ดี ดังนั้นมักนิยมนำถ่านมาใช้เป็น ฟิลเตอร์ในน้ำดื่มและยาดับกลิ่นในตู้เย็น และใช้ในการบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 2.6 แผนภาพ Van Krevlan (Mckendry, 2002)

2.6 อะลูมินา (Al_2O_3) (ธรรมา มงคลศรี)

อะลูมินามีชื่อทางเคมีว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์ันดัม (Corundum) หรืออาจได้จากการสังเคราะห์ได้จากสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในแร่บอกไซต์ (Bauxite) โดยผ่านกระบวนการเบเยอร์ (Bayer process) โดยอะลูมินานั้นมีโครงสร้างผลึกได้หลายรูปแบบ เช่น เฟสแกมมาอะลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) เฟสเดลตาอะลูมินา ($\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$) และ แอลฟาอะลูมินา ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้นตอนและภาวะในการเตรียม ดังแสดงดังรูปที่ 2.7



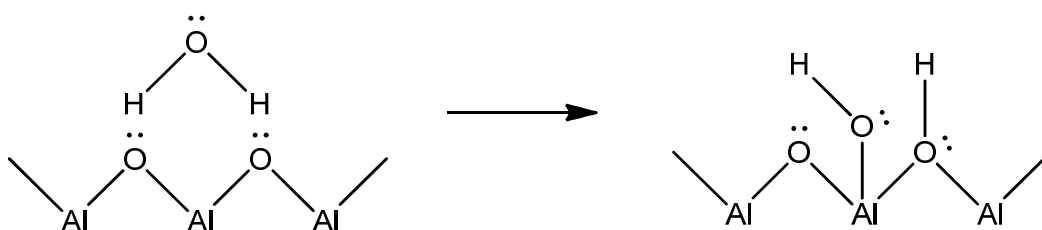
รูปที่ 2.7 เส้นทางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะลูมินา (ธวัชร มงคลศรี)

อะลูมินาที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานด้านต่าง ๆ เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาที่มีความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นสูง ความต้านทานต่อการสึกกร่อนและการขัดสีสูง ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี มีพื้นที่ผิวมาก และมีราคาถูก อะลูมินาจึงถูกนำไปใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยม

แกมมาอะลูมินาเป็นเฟสที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด เนื่องจากอะลูมินาเฟสนี้มีโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสูง (ส่วนมากอยู่ในช่วง 200-300 m^2/g) และมีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง แต่ถ้าได้รับความร้อนจนอุณหภูมิขึ้นไปสูงถึง 850 องศาเซลเซียส แกมมาอะลูมินาสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟสเดลตา (δ) และถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่า 1100 องศาเซลเซียส อะลูมินาจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟสเทตา (θ) ในที่สุด ในระหว่างที่มีเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งเป็นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเกิดการพังของโครงสร้าง ทำให้พื้นที่ผิวดลดลง

พื้นที่ผิวของอะลูมินาสามารถเกิดการรวมตัวกับความชื้นในอากาศที่อุณหภูมิต่ำ โดยเกิดการรีไฮเดรต (Rehydrate) และรีไฮดรอกซิเลท (Rehydroxylate) ปฏิกริยาดังกล่าวทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำบนพื้นผิวทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลเกาะบนผิวดังแสดงดังรูปที่ 2.8 หมู่ไฮดรอกซิลดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งความเป็นกรดและเป็นเบส โดยปกติแล้วพื้นที่ผิวของแกมมาอะลูมินาจะถูกปกคลุมด้วยความชื้นในอากาศ ถึงแม้ว่าแกมมาอะลูมินาไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100-150

องศาเซลเซียสแล้วก็ตาม แต่ก็ยังมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ค้างอยู่บนพื้นผิว ซึ่งการตกค้างของหมู่ไฮดรอกซิลจะทำหน้าที่เป็นตำแหน่งกรดบรอนสเตด (Bronsted acid) อย่างอ่อน และถ้าทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นอีกหมู่ไฮดรอกซิลดังกล่าวก็จะเกิดการควบแน่นและหลุดออกจากพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาเพิ่มขึ้น ทำให้บนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินามีการเกิดขึ้นของตำแหน่งอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) และตำแหน่งออกซิเจนไอออน (O^{2-}) ซึ่งตำแหน่ง Al^{3+} จะมีสมบัติเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส และตำแหน่ง O^{2-} จะมีสมบัติเป็นตำแหน่งเบสลิวอิส



รูปที่ 2.8 การรีไฮเดรตและรีไฮดรอกซิเลทของน้ำบนพื้นผิวอะลูมินา (ธราธร มงคลศรี)

2.7 การดูดซับ (Adsorption) (เดชา ฉัตรศิริเวช ; การดูดซับ, [ออนไลน์], 2556)

การดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณผิวร่วม (Interface) ระหว่างวัฏภาค (Phase) เช่น บริเวณผิวร่วมระหว่างของเหลวกับของแข็ง และบริเวณผิวร่วมของแก๊สกับของแข็งเป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการสะสมสารที่บริเวณผิวของของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของของแข็งนั้น โดยสารที่ถูกสะสมและดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่ทำหน้าที่สะสมหรือดูดซับสารอื่น เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) คือ การดูดซับสารถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) เป็นกระบวนการดูดซับที่มีพลังงานการดูดซับต่ำ ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนั้น

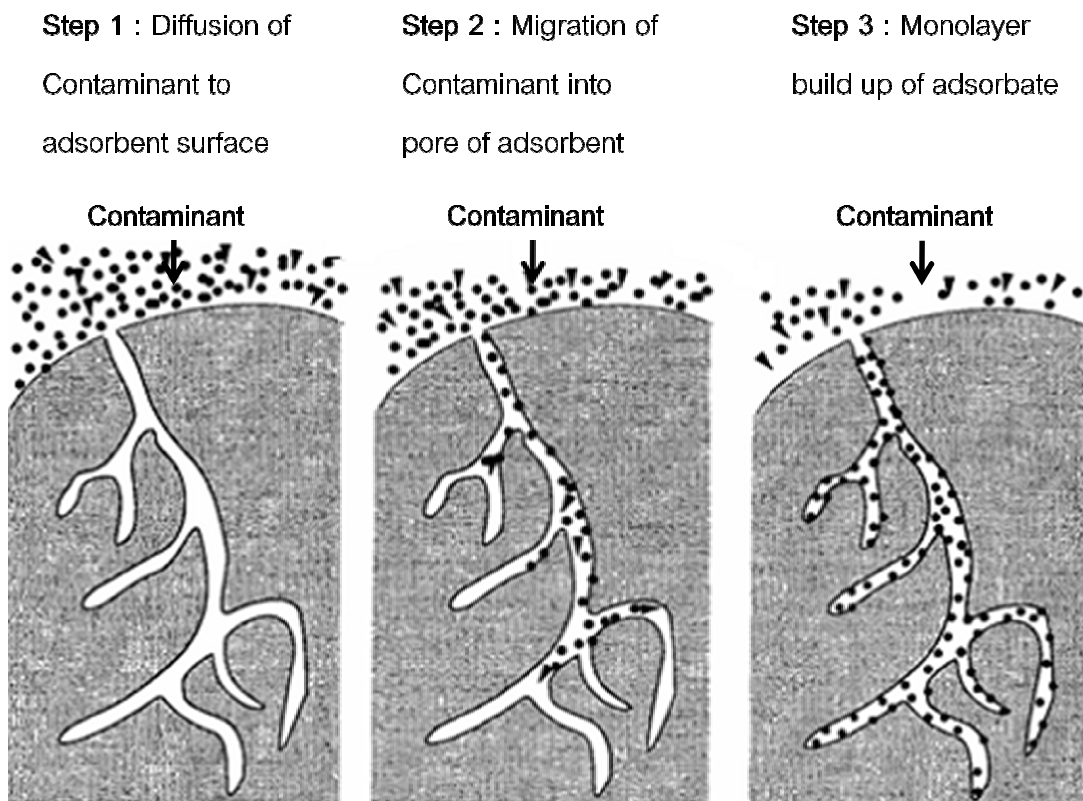
สามารถเกิดการดูดซับได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว จึงมักเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

การดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ จึงทำให้การดูดซับประเภทนี้มักจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการดูดซับเชิงเคมีจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวของตัวดูดซับเท่านั้น ดังนั้นจึงเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

2.7.1 กลไกการดูดซับ

เนื่องจากการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของสารในวัฏภาคแก๊ส หรือ ของเหลวมายังพื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นของแข็ง ขั้นตอนการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ขั้นตอนซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าไปเกาะอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ
2. การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ
3. การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดขั้นตอนที่ 3 อาจจะมีทั้งการเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางกายภาพหรือแรงทางเคมีหรือแรงทั้งสองชนิดพร้อมกันก็ได้



รูปที่ 2.9 กลไกของการดูดซับ (สุดาวลัยย์ ดำหนก, 2554)

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ธรรมชาติของตัวดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับ โดยการดูดซับส่วนใหญ่เป็นการดูดซับบนพื้นผิวของของแข็ง ดังนั้นพื้นที่ผิวของของแข็งจึงเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับ นอกจากนั้นแล้วโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับเองก็มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนมีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากขึ้น
2. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ได้แก่ ความสามารถในการละลาย น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และความมีขั้วของโมเลกุลตัวดูดซับ

3. อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มอัตราเร็วของการดูดซับ แต่ความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะลดลง เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน

4. เวลา การเพิ่มเวลาให้ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีการสัมผัสกันมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับนั้นดีขึ้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Elyoungssi และคณะ (2010) ศึกษาผลของเวลาต่อไพโรไลซิส และเวลาของสารระเหย (Volatile residence time) ในไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสต่อผลได้ของถ่านชาร์ และผลได้คาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์ พบว่าผลได้ของคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด จากนั้นจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงของผลได้คาร์บอนคงตัว ดังกล่าวสามารถแบ่งกระบวนการไพโรไลซิสเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส โดยพิจารณาได้จากการเพิ่มขึ้นของผลได้คาร์บอนคงตัวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและไพโรไลซิสส่วนแรกสิ้นสุด ณ ตำแหน่งที่ทำให้ได้ผลได้คาร์บอนคงตัวมากที่สุด ส่วนที่สองเป็นการสลายตัวของลิกนินโดยพบว่าผลได้คาร์บอนคงตัวลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของสารระเหยต่อผลได้ของถ่านชาร์และผลได้คาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์ พบว่าการเพิ่มระยะเวลาให้สารระเหยอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้นทำให้ได้ผลได้ของคาร์บอนคงตัวมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มระยะเวลาให้แก่สารระเหยเป็นการสนับสนุนให้เกิดการผลิตถ่านชาร์ทุติยภูมิ (Secondary char) ในระหว่างไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิต่ำ

Ozcimen และคณะ (2008) ศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส อัตราการให้ความร้อน และอัตราการไหลของไนโตรเจนในคาร์บอนในเซชันของเมล็ดคองุ่นและกะลาเกาลัดต่อผลได้ของถ่านชาร์ และสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้ พบว่าผลได้ของถ่านชาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนในเซชันของทั้งเมล็ดคองุ่นและกะลาเกาลัด แต่การเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนในเซชันทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีปริมาณสารระเหยลดลง เพราะในระหว่างคาร์บอนในเซชันชีวมวลทั้งสองชนิดการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นที่สองของถ่านชาร์เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์มากขึ้น

ทำให้ได้ปริมาณถ่านชาร์ที่ลดลง นอกจากนี้พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่ำจะทำให้ได้ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์มากกว่าที่อัตราการไหลสูง เนื่องจากอัตราการไหลของไนโตรเจนมีผลต่อเวลาของสารระเหยในเครื่องปฏิกรณ์และเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองของการเกิดถ่านชาร์ โดยผ่านปฏิกิริยารีโพลิเมอไรเซชัน (Repolymerisation) และรีคอนเดนเซชัน (Recondensation) ของสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็กจนได้โมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น การเพิ่มอัตราการไหลจึงเป็นการลดเวลาของไอสารระเหยทำให้ได้ผลได้ของถ่านชาร์น้อยกว่าที่อัตราการไหลต่ำ

Carrier และคณะ (2011) ศึกษาการเปรียบเทียบผลของไพโรไลซิสขนาดย่อยระหว่างไพโรไลซิสแบบช้าภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และภาวะสุญญากาศ พบว่าถ่านชาร์เตรียมภายใต้ภาวะสุญญากาศมีร้อยละผลได้น้อยกว่าถ่านชาร์ที่เตรียมภายใต้ไพโรไลซิสแบบช้า เนื่องจากภายใต้ภาวะสุญญากาศนั้นสารระเหยที่เกิดขึ้นถูกกำจัดออกอย่างรวดเร็วด้วยปั๊มสุญญากาศ ทำให้สารระเหยมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อย โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาการสร้างสายพอลิเมอร์ และปฏิกิริยาการควบแน่นของสารระเหย (Volatile condensation) ของสารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นถ่านชาร์นั้นลดลง

Borrego และคณะ (2009) ศึกษาเปรียบเทียบผลของบรรยากาศระหว่างบรรยากาศไนโตรเจนและบรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อเอกลักษณ์ของถ่านชาร์ที่เตรียมได้จากไพโรไลซิสเศษไม้และแกลบ พบว่าภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนนั้นชีวมวลมีปริมาณน้ำหนักที่หายไปมากกว่าภายใต้บรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณการระเหยของสารระเหยภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนมากกว่าปริมาณการระเหยของสารระเหยภายใต้บรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่เตรียมได้ พบว่าการเตรียมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์มากกว่าการเตรียมภายใต้บรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากภายใต้บรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์นั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าไปมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาครอสลิงค์ (Crosslinking reaction) บนพื้นที่ผิวของชีวมวลทำให้ไปขัดขวางการระเหยของสารระเหย ทำให้เกิดการระเหยได้ยากขึ้น ส่งผลให้ถ่านชาร์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่น้อยลง

Worasuwannarak และคณะ (2006) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันคาร์บอนในเซชันซึ่งข้าวโพดในน้ำร้อนความดันสูงที่มีต่อผลได้ โครงสร้าง และคุณภาพการเผาไหม้ของถ่าน

ชาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 350 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 10 เมกะพาสคัล ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์จะมีค่าลดลงจาก 46.8 เป็น 44.7 เมื่อเพิ่มความดันจาก 10 เมกะพาสคัลเป็น 18 เมกะพาสคัล คาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลงจาก 44.7 เป็น 38.6 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนในเซชันภายในน้ำความร้อนสูงกับคาร์บอนในเซชันภายใต้บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส พบว่าคาร์บอนในเซชันในน้ำความร้อนสูงให้ค่าร้อยละผลได้ของถ่านชาร์มากกว่าคาร์บอนในเซชันแบบปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันมีผลต่อปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ เมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อนและองค์ประกอบของธาตุในถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนในเซชันในน้ำความร้อนสูงนั้นมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของชีวมวลปกติถึง 1.8 เท่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนของชีวมวลได้สลายตัวในระหว่างคาร์บอนในเซชัน

Idris และคณะ (2010) ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินมาเลเชีย คัดดีต้า ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน 3 ชนิด ได้แก่ ทะลายปาล์ม ไยปาล์ม กะลาปาล์ม และเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินคัดดีต้ากับชีวมวลกะลาปาล์มระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส โดยเครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) พบว่า การสลายตัวของถ่านหินและชีวมวลเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิกว้าง ๆ โดยแบ่งการสลายตัวออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส เป็นการทำแห้งโดยการระเหยความชื้น ช่วงที่สองเป็นการปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว และช่วงสุดท้ายเป็นการปล่อยสารระเหยอย่างช้า ๆ โดยที่ชีวมวลจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าถ่านหิน เมื่อพิจารณาการสลายตัวของถ่านหินผสมชีวมวลที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าการสลายตัวจะเกิดขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน โดยที่ชีวมวลจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำและจากนั้นจะเป็นการสลายตัวของถ่านหิน จึงสรุปได้ว่า การปล่อยสารประกอบออกซิเจนในระหว่างการไพโรไลซิสชีวมวลไม่มีผลต่อไพโรไลซิสถ่านหิน

Phan และคณะ (2008) ศึกษาผลความสูงของเบดต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันเศษไม้ พบว่าความสูงของเบดมีผลอย่างมากต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้และมีผลเล็กน้อยต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความสูงของเบดในคาร์บอนในเซชันทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง เนื่องจากที่ความสูงของเบดมากทำให้เกิดที่กึ่งกลางมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลง จึงทำให้มีเวลาในการควบแน่นกลายเป็นของเหลวน้อยลงทำให้ได้ปริมาณผลได้ของ

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวน้อยลง นอกจากนั้นเพิ่มความสูงของเบดทำให้อัตราส่วนของธาตุไฮโดรเจนต่อธาตุคาร์บอนในถ่านชาร์เพิ่มขึ้น แต่ทำให้อัตราส่วนของธาตุไฮโดรเจนต่อธาตุคาร์บอนในผลิตภัณฑ์เหลวลดลง

Li และคณะ (2008) ศึกษาผลของอุณหภูมิของคาร์บอนในเซชันที่มีต่อความพรุนของถ่านกะลามะพร้าว ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 400-1000 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันจาก 400 เป็น 600 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละผลได้ของถ่านกะลามะพร้าวลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในช่วงอุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของถ่านกะลามะพร้าวจะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสซึ่งปล่อยออกมาในรูปของสารระเหย แต่ในช่วง 600-1000 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของลิกนิน ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านชีวมวลลดลง และเมื่อพิจารณาความพรุนของถ่านชีวมวลที่ผลิตได้ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความพรุนถ่านชีวมวลเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะมีการปล่อยสารระเหยออกมาเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดเป็นรูพรุนบนโครงสร้างของชีวมวลดังกล่าว

Kifanisahban และคณะ (2008) ศึกษาการสลายตัวเชิงความร้อนภายใต้บรรยากาศแก๊สของแก๊สเชื้อเพลิงโดยเครื่อง Thermogravimetric analysis ของไม้ยูคาลิปตัส ไชแลน (Xylan) เซลลูโลส และลิกนิน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าการสลายตัวของลิกนินเกิดได้ช้าที่สุด ทำให้ได้ปริมาณถ่านชาร์มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงจึงสลายตัวได้ยาก อีกทั้งการสลายตัวของลิกนินถูกบดบังโดยการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส จึงทำให้มีการสลายตัวน้อยเหลือเป็นผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์มากขึ้น

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

- 3.1.1 เครื่องบดซีวมวลชนิดละเอียด
- 3.1.2 เครื่องคัดขนาด ENDECOTT SHAKER รุ่น EF. 1-1M411
- 3.1.3 ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร 1 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร
- 3.1.4 ตู้อบ รุ่น Binder FD-115
- 3.1.5 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.1.6 ถังเก็บแก๊ส
- 3.1.7 โถร่งบด
- 3.1.8 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3.1.9 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร
- 3.1.10 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- 3.1.11 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
- 3.1.12 เตาเผาความร้อนสูง (Muffle furnace) Carbolite รุ่น ESF 12/23
- 3.1.13 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อ (Tubular furnace) Carbolite รุ่น Eurotherm 2416 CG
- 3.1.14 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric analyzer, TGA) Perkin Elmer รุ่น Pyris diamond เพื่อวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์ม
- 3.1.15 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน (CHNO/S analyzer) Perkin Elmer รุ่น PE-2400

- 3.1.16 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb calorimeter) รุ่น Parr 6200
- 3.1.17 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) Shimadzu รุ่น GC-2014

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 กะลาปาล์ม ขนาด 1 – 2 มิลลิเมตร จากบริษัทไฮบริด เอนเนอยี จำกัด
- 3.2.2 แก๊สไนโตรเจน (N_2) 99.99% จาก บริษัทแพรกแอร์ ประเทศไทย จำกัด
- 3.2.3 แกมมาอะลูมินา ($\gamma-Al_2O_3$) ขนาด 2-3 มิลลิเมตร จากบริษัท Jiangxi Pingxiang Dier Chemical Packing จำกัดมหาชน
- 3.2.4 อะซิโตนและซิลิกาเจล จากบริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา

บดกะลาปาล์มโดยเครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด จากนั้นนำไปร่อนให้มีขนาด 250 ไมโครเมตร สำหรับนำไปวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิงของกะลาปาล์ม และขนาด 1-2 มิลลิเมตร สำหรับใช้ในการทดลองคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม จากนั้นนำกะลาปาล์มที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาข้ามคืนแล้วเก็บในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปทำคาร์บอนในเซชัน ส่วนแกมมาอะลูมินาจะทำการเผา (calcinations) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำมาทำการทดลองเพื่อทำการไล่ความชื้น

3.3.2 คาร์บอนในเซชัน

3.3.2.1 นำผงกะลาปาล์มจำนวน 6 กรัม (ความสูง 2.2 เซนติเมตร) ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง และเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งใส่ลงไปในขวดลดความร้อน

3.3.2.2 ทำการผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อไล่อากาศเป็นเวลา 20 นาที ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

3.2.2.3 จากนั้นให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิในคาร์บอนในเซชัน 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส จับเวลาในคาร์บอนในเซชันโดยเริ่มนับเวลาดังแต่จุดอุณหภูมิถึงค่าที่กำหนด จนครบ 30 นาที

3.2.2.4 ทำการเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์จนถึงครบเวลาในการทำทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.2.2.5 เมื่อครบเวลาในการทำทดลอง ทำการลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จนถึง 80 องศาเซลเซียสแล้วทำการปิดเครื่อง

3.2.2.6 นำของแข็งที่เหลือจากคาร์บอนในเซชันที่ได้มาซึ่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ และถ่านชาร์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง ได้แก่การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ การวิเคราะห์ค่าความร้อน การวิเคราะห์พื้นผิวของถ่านชาร์ ส่วนแก๊สมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันแล้วจะถูกนำไปศึกษาการนำแก๊สมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำ โดยผ่านการเผาภายใต้บรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียสต่อไป

3.3.3 การคำนวณร้อยละผลได้ของถ่านชาร์

นำถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นทำการคำนวณหาร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ จากสมการที่ 3.1

$$\text{ค่าร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ (\% Char yield)} = \frac{M_{\text{Ch}}}{M_{\text{R}}} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย M_{R} = น้ำหนักของกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดลอง
 M_{Ch} = น้ำหนักของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชัน

3.3.4 คาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา

3.3.4.1 นำกะลาปาล์มผสมแกมมาอะลูมินาในอัตราส่วนโดยมวล 1.0:0.0, 1.0:0.5, 1.0:1.0, 1.0:1.5 และ 1.0:2.0 ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยให้น้ำหนักของกะลาปาล์มคงที่ที่ 6 กรัม และนำเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งใส่ลงไปในชุดลดความร้อน

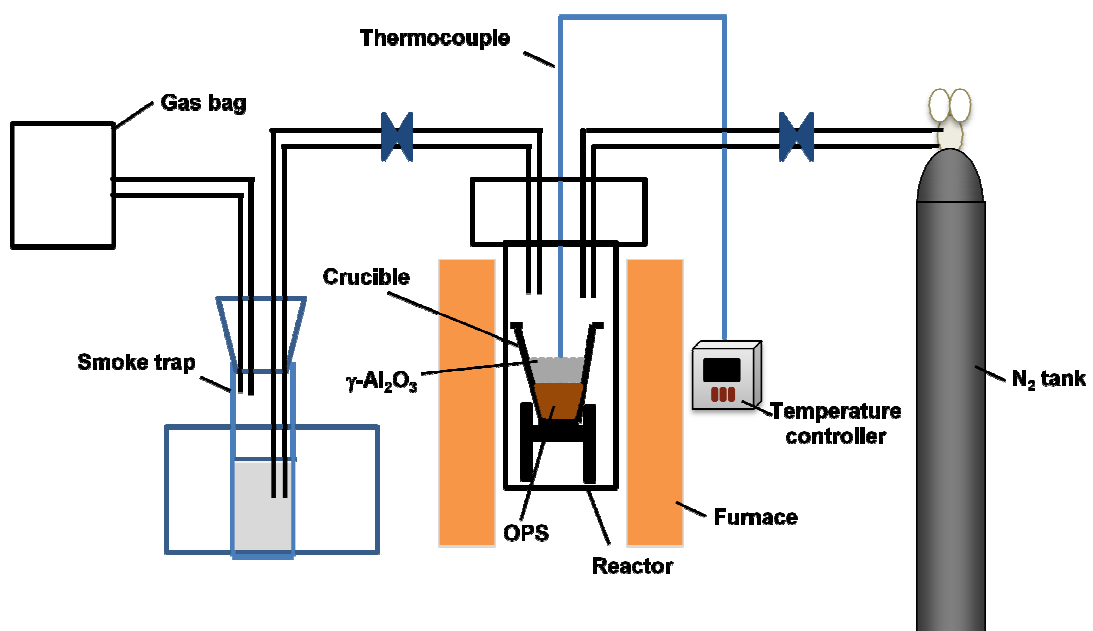
3.3.4.2 ทำการผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อไล่อากาศเป็นเวลา 20 นาที

3.3.4.3 จากนั้นให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิในคาร์บอนในเซชัน 400 และ 450 องศาเซลเซียส จับเวลาในคาร์บอนในเซชันโดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่อุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดจนครบ 30 นาที

3.3.4.4 ทำการเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์จนถึงครบเวลาในการทำการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.3.4.5 เมื่อครบเวลาในการทดลอง ทำการลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จนถึง 80 องศาเซลเซียสแล้วทำการปิดเครื่อง

3.3.4.6 นำของแข็งที่เหลือจากคาร์บอนไนเซชันมาทำการแยกถ่านชาร์และแก๊มาอะลูมินาหลังจากคาร์บอนไนเซชันด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำถ่านชาร์และแก๊มาอะลูมินาที่ได้มาซึ่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และร้อยละผลได้ของคาร์บอน ถ่านชาร์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง ได้แก่การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ การวิเคราะห์ค่าความร้อน การวิเคราะห์พื้นผิวของถ่านชาร์



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับคาร์บอนไนเซชัน

3.3.5 การคำนวณร้อยละผลได้ของคาร์บอน

นำแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นทำการคำนวณหา น้ำหนักของคาร์บอนบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินา น้ำหนักของคาร์บอนทั้งหมดที่ได้จาก คาร์บอนไนเซชันและร้อยละผลได้ของคาร์บอน จากสมการที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$\text{น้ำหนักของคาร์บอนบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินา} = M_{A,F} - M_{A,I} \quad (3.2)$$

$$\text{น้ำหนักของคาร์บอนทั้งหมด} = M_{CC} + M_{CA} \quad (3.3)$$

$$\text{ค่าร้อยละผลได้ของคาร์บอน (\% Carbon yield)} = \frac{M_C}{M_R} \times 100 \quad (3.4)$$

โดย	M_{CA}	=	น้ำหนักคาร์บอนบนผิวแกมมาอะลูมินา
	M_{CC}	=	น้ำหนักคาร์บอนในถ่านชาร์
	$M_{A,I}$	=	น้ำหนักแกมมาอะลูมินาก่อนคาร์บอนไนซ์
	$M_{A,F}$	=	น้ำหนักแกมมาอะลูมินาหลังคาร์บอนไนซ์
	M_C	=	น้ำหนักคาร์บอนทั้งหมด
	M_R	=	น้ำหนักของกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดลอง
	M_{Ch}	=	น้ำหนักของคาร์บอนในถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนไนเซชัน

3.3.6 การวิเคราะห์แบบประมาณ

3.3.6.1 การหาปริมาณความชื้น

การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของกะลาปาล์มและถ่านชาร์ตามมาตรฐาน ASTM D3173 โดยนำกะลาปาล์มและถ่านชาร์มาบดให้มีขนาด 250 ไมโครเมตร จำนวน 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องในตู้อบ รุ่น Binder FD-115 ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักของแข็งหลังผ่านการอบ และคำนวณปริมาณความชื้นดังสมการที่ 3.5

$$M = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น
 W_1 = น้ำหนักของของแข็งก่อนทดสอบ
 W_2 = น้ำหนักของของแข็งหลังทดสอบ

3.3.6.2 การหาปริมาณเถ้า

การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าของกะลาปาล์มและถ่านชาร์ตามมาตรฐาน ASTM D3174 นำถ้วยกระเบื้องมาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำกะลาปาล์มและถ่านชาร์ขนาด 250 ไมโครเมตร จำนวน 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องแล้วนำไปเผาในเตาเผาความร้อนสูง Carbolite รุ่น ESF 12/23 นาน 3 ชั่วโมง จากนั้นรอให้เย็นและนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณเถ้าดังสมการที่ 3.6

$$A = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ	A	=	ร้อยละของปริมาณแก้ว
	W_1	=	น้ำหนักของของแข็งก่อนทดสอบ
	W_2	=	น้ำหนักของของแข็งหลังทดสอบ

3.3.6.3 การหาปริมาณสารระเหย

การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยของกะลาปาล์มและถ่านชาร์ตามมาตรฐาน ASTM D3175 นำถ้วยกระเบื้องมาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำออกมาทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำกะลาปาล์มและถ่านชาร์ขนาด 250 ไมโครเมตรที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นแล้ว จำนวน 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องแล้วนำไปเผาในเตาเผาแบบท่อ Carbolite รุ่น Eurotherm 2416 CG โดยเริ่มให้ความร้อนแก่ของแข็งที่บริเวณด้านบนของเตาเผาแบบท่อ นาน 3 นาที และบริเวณกลางเตาเผาแบบท่อต่ออีก 7 นาทีตามลำดับ จากนั้นนำออกมา รอให้เย็นและนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณแก้วดังสมการที่ 3.7

$$V = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของปริมาณสารระเหย
	W_1	=	น้ำหนักของของแข็งก่อนทดสอบ
	W_2	=	น้ำหนักของของแข็งหลังทดสอบ

3.3.6.4 การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว

การหาปริมาณคาร์บอนคงตัวในของแข็งตัวอย่างคำนวณได้จากสมการที่ 3.8

$$C = 100 - (M + A + V) \quad (3.8)$$

เมื่อ	C	=	ร้อยละของคาร์บอนคงตัว
	M	=	ร้อยละของปริมาณความชื้น
	A	=	ร้อยละของปริมาณเถ้า
	V	=	ร้อยละของปริมาณสารระเหย

3.3.7 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน ธาตุไนโตรเจน และธาตุออกซิเจนในกะลาปาล์มและถ่านชาร์ โดยนำกะลาปาล์มและถ่านชาร์ขนาด 250 ไมโครเมตรมาทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยเครื่อง CHN analyzer Perkin Elmer รุ่น PE-2400 ภายใต้บรรยากาศของแก๊สออกซิเจน

3.3.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของกะลาปาล์มและถ่านชาร์ตามมาตรฐาน ASTM 2015 โดยนำกะลาปาล์มและถ่านชาร์ขนาด 250 ไมโครเมตร จำนวน 1 กรัมใส่ลงในถ้วยโลหะ จากนั้นตัดลวด Fuse wire ยาว 10 เซนติเมตรมาร้อยผ่านของแข็งที่จะทำการวิเคราะห์โดยห้ามลวดโดนถ้วยโลหะ จากนั้นทำการอัดแก๊สออกซิเจนความดัน 30 บรรยากาศ แล้วนำเข้าเครื่อง Bomb calorimeter รุ่น Parr 6200

3.3.9 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์ม โดยนำกะลาปาล์ม ขนาด 250 ไมโครเมตร จำนวน 10 ไมโครกรัมใส่ลงในอะลูมินาแพน จากนั้นนำเข้าเครื่อง Thermal gravimetric/Differential Thermal Analyzer (TG/DTA) Perkin Elmer รุ่น Pyris diamond ภาวะที่ทำการทดลองภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 50 มิลลิเมตรต่อนาที เริ่มวิเคราะห์ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง จนถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.3.10 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์

วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์ โดยนำถ่านชาร์มาเคลือบผิวด้วยโลหะทอง ในเครื่องเคลือบโลหะสุญญากาศ เพื่อให้ถ่านชาร์มีสภาพนำและทำให้เกิดอิเล็กตรอน หลังจากนั้นนำเข้าเครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-5800LV ที่ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

3.3.11 การวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์

วิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากเครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบเทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) ชนิดคอลัมน์ที่ใช้คือ unibeads C packed column โดยมีภาวะที่ใช้งานคือ อุณหภูมิหัวฉีด 120 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ 50 – 180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 120 องศาเซลเซียส แก๊สตัวพา คือ แก๊สอาร์กอน

3.3.12 การศึกษาการนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ใหม่ (Regenerate of γ -Al₂O₃)

ศึกษาการนำกลับแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันแล้ว โดยนำแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันแล้วใส่ในถ้วยครุชีเบิล แล้วนำไปชั่งน้ำหนักก่อนทำการนำกลับมาใช้ใหม่ จากนั้นนำถ้วยครุชีเบิลดังกล่าวไปให้ความร้อนด้วยเตาเผาแบบท่อ ที่อุณหภูมิ 700 ถึง 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำแกมมาอะลูมินาที่ผ่านการเผาได้กแล้วไปทำคาร์บอนในเซชันร่วมกับกะลาปาล์มต่อไป

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาปาล์ม

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของกะลาปาล์ม

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบแบบประมาณโดยใช้เทคนิค ASTM D3172-D3175 แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของกะลาปาล์มที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง พบว่ากะลาปาล์มมีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 73.04 มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 16.98 มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 7.40 และมีปริมาณเถ้าร้อยละ 2.58 เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่า กะลาปาล์มประกอบด้วยธาตุคาร์บอนร้อยละ 46.02 ธาตุไฮโดรเจนร้อยละ 6.02 ธาตุออกซิเจนร้อยละ 47.68 และมีค่าความร้อน 4,825 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม จากข้อมูลดังกล่าวกะลาปาล์มมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่น่าสนใจ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลสมบัติของถ่านหินที่มีศักดิ์ต่าง ๆ (Coal rank) ดังตารางที่ 4.2 พบว่ากะลาปาล์มมีค่าความร้อนอยู่ในช่วงของถ่านหินลิกไนต์กับถ่านหินซับบิทูมินัสซึ่งเป็นถ่านหินศักดิ์ต่ำ อย่างไรก็ตามหากนำกะลาปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งโดยตรง นั้นจะส่งผลให้การเผาไหม้มีปริมาณเขม่ามากซึ่งทำให้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ไม่ดี เนื่องจากมีปริมาณสารระเหยเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำกะลาปาล์มมาทำการปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิงก่อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาคาร์บอนในเซชันเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิงของกะลาปาล์ม

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุของกะลาปาล์ม

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาปาล์ม	ร้อยละโดยน้ำหนัก
การวิเคราะห์แบบประมาณ ¹	
สารระเหย	73.04
คาร์บอนคงตัว	16.98
ความชื้น	7.40
เถ้า	2.58
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ²	
คาร์บอน	46.02
ไฮโดรเจน	6.02
ไนโตรเจน	0.28
ออกซิเจน ³	47.68
ค่าความร้อน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	4,825.15

¹ พื้นฐานที่รับมา (as received basis)

² ร้อยละแบบไม่คิดเถ้า (dry ash free basis)

³ ออกซิเจน = 100 - ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นออกซิเจน

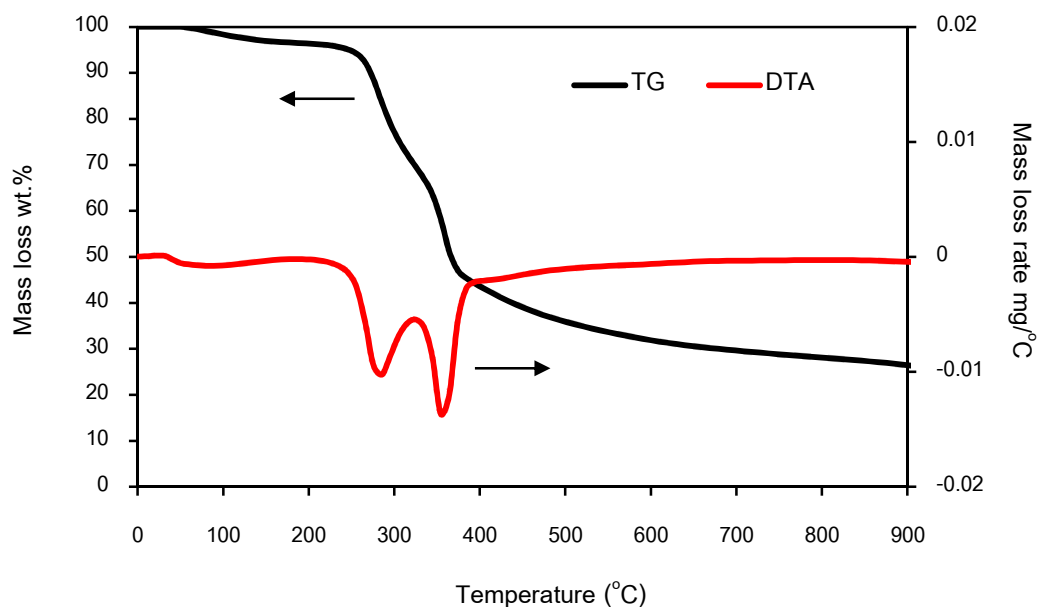
ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนของถ่านหินศักดิ์ต่าง ๆ (Coal rank)

ชนิดของถ่านหิน	ค่าความร้อน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)
ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite)	7,161.90
ถ่านหินบิทูมินัสชนิดสารระเหยต่ำ (Low-volatile bituminous)	7,982.22
ถ่านหินบิทูมินัสชนิดสารระเหยปานกลาง (Medium-volatile bituminous)	7,703.90
ถ่านหินบิทูมินัสชนิดสารระเหยสูง (High-volatile bituminous)	7,286.30
ถ่านหินซับบิทูมินัส (Subbituminous)	5,093.17
ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite)	3,840.84

ที่มา : www.engineeringtoolbox.com

4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์มด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

เมื่อนำกะลาปาล์มมาทดสอบการสลายตัวทางความร้อนภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่ากะลาปาล์มมีการสลายตัวทางความร้อนแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกตั้งแต่อุณหภูมิ 80 – 120 องศาเซลเซียส แสดงการสูญเสียน้ำหนักของกะลาปาล์มในปริมาณร้อยละ 5 เนื่องจากการกำจัดความชื้นที่อยู่ในตัวกะลาปาล์ม ช่วงที่สองและช่วงที่สามเป็นการสลายตัวของ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ที่เป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวลในรูปของสารระเหยออกจากกะลาปาล์ม โดยเฮมิเซลลูโลสที่มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา ทำให้พันธะไม่แข็งแรงจึงสลายตัวออกมาก่อน ในช่วงอุณหภูมิ 220 – 320 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะเป็นการสลายตัวของเซลลูโลสที่มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นสายโซ่ตรงของกลูโคสและแรงภายในเป็นพันธะไฮโดรเจนทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและแข็งแรงจึงสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 320 – 500 องศาเซลเซียส ส่วนลิกนินจะสลายตัวอย่างช้าๆ และอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างตั้งแต่ 200 – 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากลิกนินเป็นสารเอโรมาติกเชิงซ้อนจึงเป็นองค์ประกอบที่เสถียรที่สุดในชีวมวลทำให้เกิดการสลายตัวยากกว่าเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสและจากการสลายตัวอย่างช้า ๆ ของลิกนินทำให้เหลือเป็นองค์ประกอบหลักของถ่านชาร์ โดยกะลาปาล์มจะเกิดการสลายตัวสูงสุดในช่วง 350 – 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเลือกช่วงอุณหภูมิดังกล่าวไปทดลองคาร์บอนไนเซชันกะลาปาล์มเพื่อให้ได้ปริมาณถ่านชาร์มากที่สุด



รูปที่ 4.1 การสลายตัวทางความร้อนของอะครีลาไมด์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

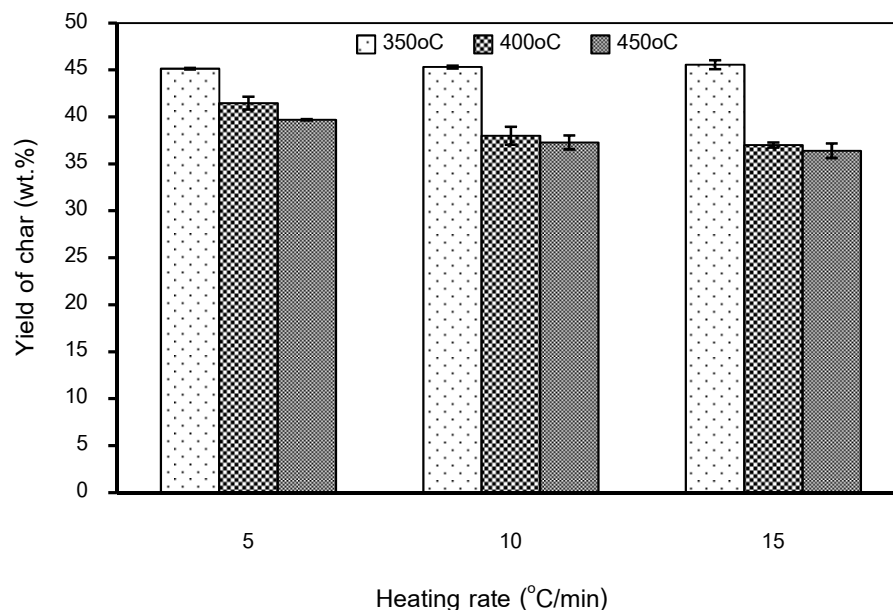
4.2 คาร์บอนในเซชันอะครีลาไมด์

ศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันและอัตราการให้ความร้อนต่อปริมาณและสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้ โดยศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้แก่ การวิเคราะห์โดยประมาณ วิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านชาร์

4.2.1 ผลของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์

รูปที่ 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันอะครีลาไมด์ ภายใต้อุณหภูมิการ์บอนในเซชัน 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการคาร์บอนในเซชัน 30 นาที พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการ์บอนในเซชันโดยให้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลง โดยการเพิ่มอุณหภูมิการ์บอน

เซชันจาก 350 เป็น 400 และ 450 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของคาร์บอนลดลงจาก 45.34 เป็น 38.01 และ 37.28 ตามลำดับ เนื่องจากคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิต่ำนั้นกะลาปาล์มยังมีการสลายตัวทางความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยในปริมาณน้อยจึงได้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ในปริมาณมาก (Inagaki และคณะ, 2010) แต่การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันเป็นการเพิ่มพลังงานในการสลายพันธะของกะลาปาล์มโดยเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกะลาปาล์มเกิดการสลายตัวและถูกกำจัดออกในรูปของสารระเหยทั้งในรูปของสารระเหยที่สามารถควบแน่นได้ เช่น กรดแอซิติค และน้ำมันทาร์ และในรูปของแก๊ส เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์มด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA) ดังรูปที่ 4.1 ที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิช่วง 350-450 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์มมากที่สุด



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนของการคาร์บอนในเซชันต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์

เมื่อพิจารณาผลของอัตราการให้ความร้อนต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนส่งผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลง เนื่องจากอัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสเซลลูโลส โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้เป็นแอนไฮโดรเซลลูโลส (anhydrocellulose) ที่มีโครงสร้างที่เสถียรขึ้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ที่มากขึ้น ในคาร์บอนเซชันที่อัตราการให้ความร้อนสูงจะส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันนั้นสั้นลง ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลง (Yan และคณะ, 2011) แต่จากรูปดังกล่าว พบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนไม่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบในกะลาปาล์มยังสลายตัวทางความร้อนไม่สมบูรณ์ แต่ที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นช่วงที่เซลลูโลสมีการสลายตัวอย่างรวดเร็ว การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจึงมีผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลงอย่างมากในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว

4.2.2 ผลของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่อสมบัติของถ่านชาร์

ตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนเซชันภายใต้อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาคาร์บอนเซชัน 30 นาที พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิโดยให้อัตราการให้ความร้อนคงที่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที มีผลต่อองค์ประกอบของถ่านชาร์ที่ได้ การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนเซชันจาก 350 เป็น 450 องศาเซลเซียส ส่งผลให้องค์ประกอบของสารระเหยในถ่านชาร์ลดลงจาก 33.65 เป็น 20.74 ซึ่งคิดเป็นร้อยละการเปลี่ยนแปลง 38.36 เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งเสริมให้มีการสลายตัวแบบสมบูรณ์ของสารตั้งต้น (ประโยชน์ ศรีสุภานันต์, 2528) โดยทั้งเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ จึงถูกกำจัดออกในรูปสารระเหยในปริมาณมาก และส่งผลต่อองค์ประกอบของคาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

(Demirbas, 2004) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอัตราส่วนเชื้อเพลิง (Fuel ratio) ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ ตามการคำนวณอัตราส่วนเชื้อเพลิง จากสมการ 4.1 (กัญจนา บุญยาเกียรติ, 2549) ดังนี้

$$\text{Fuel ratio} = \frac{\text{Fix carbon (FC)}}{\text{Volatile matter (VM)}} \quad (4.1)$$

โดย FC คือ ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์ และ VM คือ ร้อยละของสารระเหยในถ่านชาร์ พบว่าคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะให้อัตราส่วนเชื้อเพลิง 1.78 คาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะให้อัตราส่วนเชื้อเพลิง 2.72 คาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะให้อัตราส่วนเชื้อเพลิง 3.48 ซึ่งอัตราส่วนเชื้อเพลิงของถ่านชาร์ที่ได้มีค่าสูงขึ้นจากของกะลาปาล์มที่มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงเพียง 0.23 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนเชื้อเพลิงของถ่านหินและอัตราส่วนเชื้อเพลิงของถ่านชาร์ที่ได้พบว่าถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 0.5-3 ซึ่งเป็นศักดิ์ของถ่านหิน (Coal rank) ในช่วงบิทูมินัส แต่ถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 3-7 ซึ่งมีศักดิ์เทียบเท่ากับถ่านหินเซมิบิทูมินัส โดยตารางศักดิ์ของถ่านหินจะแสดงในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านซาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันภายใต้อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ¹	อุณหภูมิการคาร์บอนในเซชัน (องศาเซลเซียส)		
	350	400	450
อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที			
ความชื้น	2.52	4.22	3.88
เถ้า	2.47	2.93	3.43
สารระเหย	31.32	26.10	20.78
คาร์บอนคงตัว	63.69	66.75	71.91
อัตราส่วนเชื้อเพลิง	2.03	2.56	3.46
อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที			
ความชื้น	4.12	3.18	4.26
เถ้า	2.49	2.88	2.78
สารระเหย	33.65	25.32	20.74
คาร์บอนคงตัว	59.74	68.62	72.22
อัตราส่วนเชื้อเพลิง	1.77	2.71	3.48
อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที			
ความชื้น	2.49	3.89	3.96
เถ้า	2.65	2.83	2.81
สารระเหย	34.22	24.54	20.66
คาร์บอนคงตัว	60.64	68.74	72.57
อัตราส่วนเชื้อเพลิง	1.77	2.80	3.51

¹ พื้นฐานที่รับมา (as-received basis)

ตารางที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันภายใต้อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในคาร์บอนในเซชัน 30 นาที พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ่านชาร์ที่ได้มีปริมาณธาตุไฮโดรเจนและธาตุออกซิเจนลดลง การลดลงของธาตุไฮโดรเจนและธาตุออกซิเจนของถ่านชาร์เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานในการแตกพันธะที่ไม่แข็งแรง (weak bond) (Uemura และคณะ, 2011) โดยผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) (Fu และคณะ, 2012) โดยที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 450 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่มีร้อยละของออกซิเจนต่ำสุดที่ 20 ซึ่งลดลงจากปริมาณธาตุออกซิเจนในชีวมวลเริ่มต้นถึงร้อยละ 58.83 และให้ร้อยละของธาตุคาร์บอนมีค่าสูงสุดที่ 75.76 โดยเพิ่มขึ้นจากกะลาปาล์มถึงร้อยละ 64.52

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของถ่านชาร์ จากคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มด้วยอุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิของคาร์บอนในเซชันเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น โดยที่ถ่านชาร์มีค่าความร้อนเป็น 6,601.62, 6,900.55 และ 7,211.85 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และการเพิ่มอุณหภูมิสามารถเพิ่มค่าความร้อนของถ่านชาร์จากกะลาปาล์มเริ่มต้นถึงร้อยละ 36.82, 43.15 และ 49.46 ดังนั้นการนำถ่านชาร์ที่ได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงจะมีคุณภาพทางเชื้อเพลิงดีกว่าการนำกะลาปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง

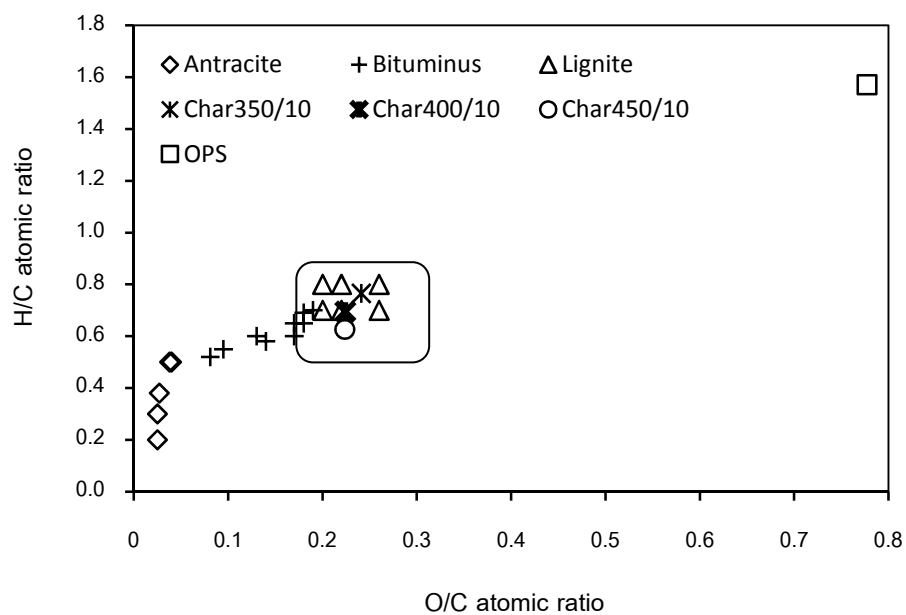
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชัน ภายใต้คุณสมบัติคาร์บอนในเซชัน 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ¹	คุณสมบัติการคาร์บอนในเซชัน (องศาเซลเซียส)		
	350	400	450
อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที			
คาร์บอน	68.30	73.44	76.62
ไฮโดรเจน	4.35	4.01	3.45
ไนโตรเจน	1.05	0.48	0.19
ออกซิเจน ²	26.30	22.07	19.74
ค่าความร้อน (kcal/kg-dry)	6,796.03	6,959.48	7,160.50
อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที			
คาร์บอน	68.79	72.71	75.76
ไฮโดรเจน	4.58	3.95	3.85
ไนโตรเจน	0.55	0.71	0.39
ออกซิเจน ²	26.06	22.63	20.00
ค่าความร้อน (kcal/kg-dry)	6,601.62	6,900.70	7,211.85
อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที			
คาร์บอน	68.18	72.50	76.04
ไฮโดรเจน	4.54	3.90	3.96
ไนโตรเจน	0.66	0.51	0.40
ออกซิเจน ²	26.60	23.08	19.60
ค่าความร้อน (kcal/kg-dry)	6,517.37	6,910.51	7,285.27

¹ ร้อยละแบบไม่คิดเถ้า (dry ash free basis)

² ออกซิเจน = 100 – ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นออกซิเจน

จากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนของถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่ถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันที่ 350 องศาเซลเซียสมีอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 0.77 และอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 0.24 ในขณะที่ถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันที่ 450 องศาเซลเซียสมีอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 0.63 และอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 0.22 การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลง จากผลดังกล่าวสามารถบ่งบอกได้ว่าถ่านชาร์มีโครงสร้างที่มีความเป็นแอโรแมติก (Aromatic) และโครงสร้างที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous) เพิ่ม



รูปที่ 4.3 อัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนของถ่านหินแอนทราไซต์ ถ่านหินบิทูมินัส ถ่านหินลิกไนท์ และถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในคาร์บอนไนเซชัน 30 นาที อุณหภูมิ 350 400 และ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับ

มากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียโครงสร้างของหมู่ออกซิเจน (Oxygen species) และเกิดการแทนที่ (Substitution) โครงสร้างของหมู่ออกซิเจน (Phan และคณะ, 2009) ทำให้ถ่านชาร์มีค่าความร้อนสูงกว่ากะลาปาล์ม

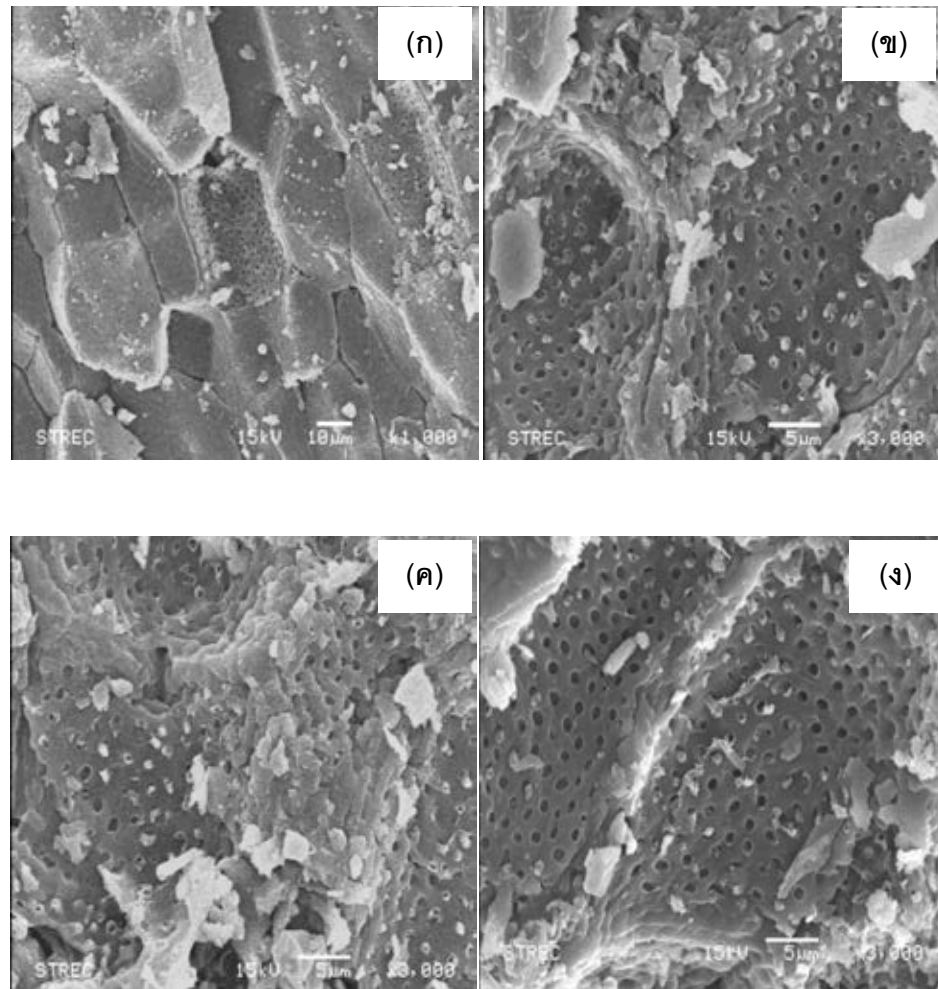
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการให้ความร้อนต่อสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้ พบว่าการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันคงที่ พบว่าการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนส่งผลให้ถ่านชาร์มีปริมาณสารระเหยลดลง และในขณะเดียวกันมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนเป็นการเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหยในระหว่างคาร์บอนไนเซชัน และเมื่อพิจารณาแบบแยกธาตุ พบว่าถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ ไม่ส่งผลต่อองค์ประกอบของถ่านชาร์ โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอนใกล้เคียงกัน ส่งผลให้มีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกัน จากนั้นพิจารณาอัตราส่วนเชื้อเพลิงพบว่าการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนส่งผลให้ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น

จากการพิจารณาผลของอัตราการให้ความร้อนต่อคาร์บอนไนเซชันกะลาปาล์ม ในช่วง 5 – 15 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที นั้นให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์สูง แต่ถ่านชาร์ที่ได้มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ำ และเมื่อพิจารณาที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า อัตราการให้ความร้อนที่ 15 องศาเซลเซียสต่อนาทีนั้นส่งผลให้ถ่านชาร์มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงสูงสุดแต่กลับให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ต่ำสุด และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์สูงสุดแต่ถ่านชาร์ที่ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงเช่น ค่าความร้อนและอัตราส่วนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อัตราการให้ความร้อนคงที่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส ในการทดลองอื่นต่อไป

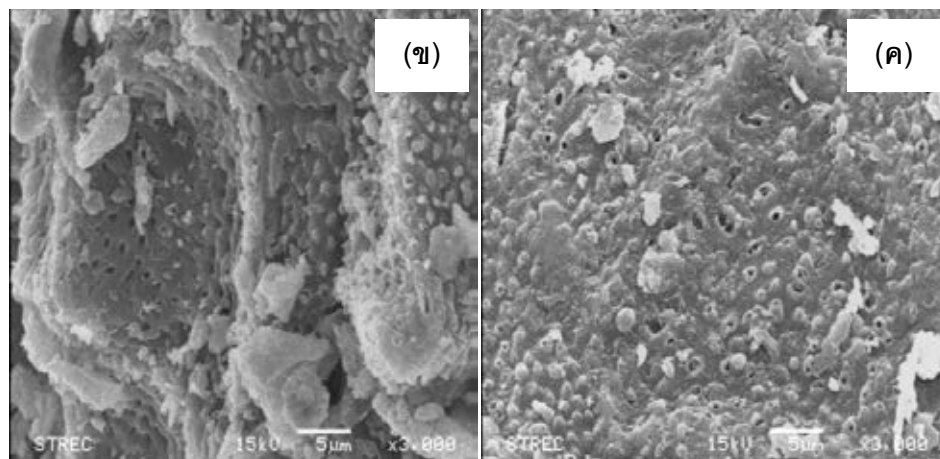
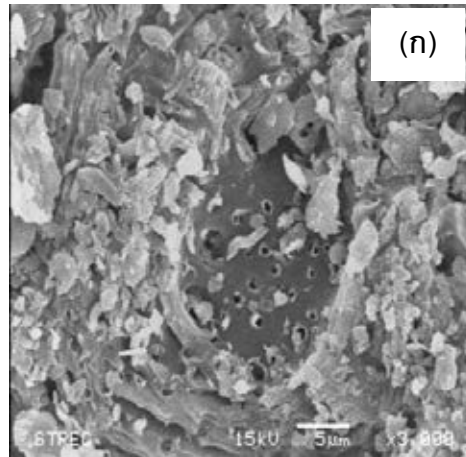
4.2.3 ผลของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่อลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะพื้นผิวของกะลาปาล์มและถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส โดยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที พบว่าคาร์บอนในเซชันทำให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของถ่านชาร์ ทั้งนี้เกิดจากการปลดปล่อยสารระเหยในระหว่างคาร์บอนในเซชันของกะลาปาล์ม เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านชาร์พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน จะมีการเปิดของรูพรุนมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหยออกจากรูพรุนดังกล่าวมากขึ้น (Phan และคณะ, 2009)

เมื่อพิจารณาถึงผลของอัตราการให้ความร้อนต่อลักษณะโครงสร้างของรูพรุน ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 พบว่า อัตราการให้ความร้อนมีผลต่อโครงสร้างของรูพรุน โดยถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนในเซชันที่อัตราการให้ความร้อนสูงจะให้รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ โดยอัตราการให้ความร้อนส่งผลให้ต่ออัตราเร็วในการปลดปล่อยสารระเหย ในคาร์บอนในเซชันที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ สารระเหยจากกระบวนการคาร์บอนในเซชันมีเวลามากเพียงพอที่จะแพร่จากอนุภาคของแข็ง ในขณะที่การเพิ่มอัตราการให้ความร้อน จะทำให้ระยะเวลาในการปลดปล่อยสารระเหยสั้นลงซึ่งเป็นผลให้เกิดการสะสมของสารระเหยทั้งระหว่างอนุภาคและภายในอนุภาคของของแข็ง เมื่อมีการสะสมสารระเหยมากขึ้น สารระเหยดังกล่าวจะผลึกผนังด้านนอกของอนุภาคของแข็งออกมา ทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดความเสียหายของโครงสร้างรูพรุน (Angin, 2013)



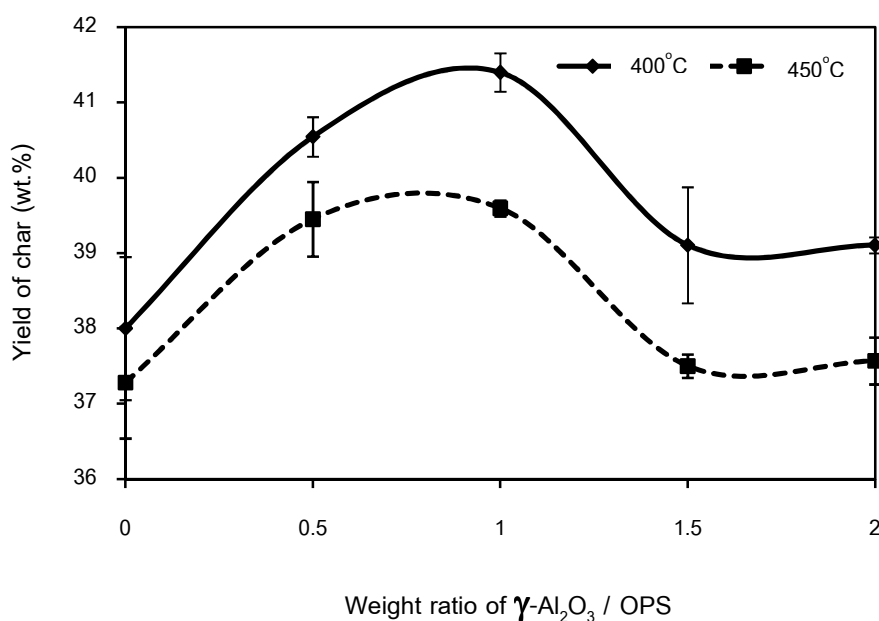
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของ (ก) กะลาปาล์ม (ข) ถ่านชาร์จากคาร์บอนไนเซชันที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส (ค) ถ่านชาร์จากคาร์บอนไนเซชันที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (ง) ถ่านชาร์จากคาร์บอนไนเซชันที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์จากคาร์บอนในเซชันอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส (ก) อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที (ข) อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที (ค) อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที

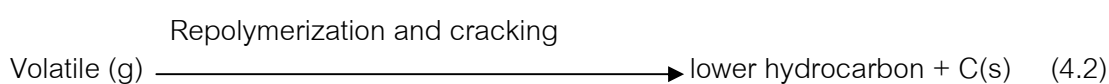
4.3 ผลของแกมมาอะลูมินาต่อคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม

รูปที่ 4.6 แสดงผลของแกมมาอะลูมินาต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนในเซชัน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400 และ 450 องศาเซลเซียส เวลาในคาร์บอนในเซชัน 30 นาที โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินา ต่อกะลาปาล์มตั้ง 0 ถึง 2 พบว่าคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มโดยไม่มีแกมมาอะลูมินาเป็นวัสดุเบดที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์เท่ากับ 38.00 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดย น้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มจะให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์สูงขึ้น โดยให้ร้อยละ ผลได้ของถ่านชาร์สูงสุดถึงร้อยละ 41.40 คิดเป็นการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 8.9 เทียบกับการไม่ใช้ วัสดุเบด เนื่องจากแกมมาอะลูมินาที่ใช้เป็นวัสดุเบดร่วมในคาร์บอนในเซชันนั้นทำให้ความสูงของ



รูปที่ 4.6 ผลของแกมมาอะลูมินาต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์

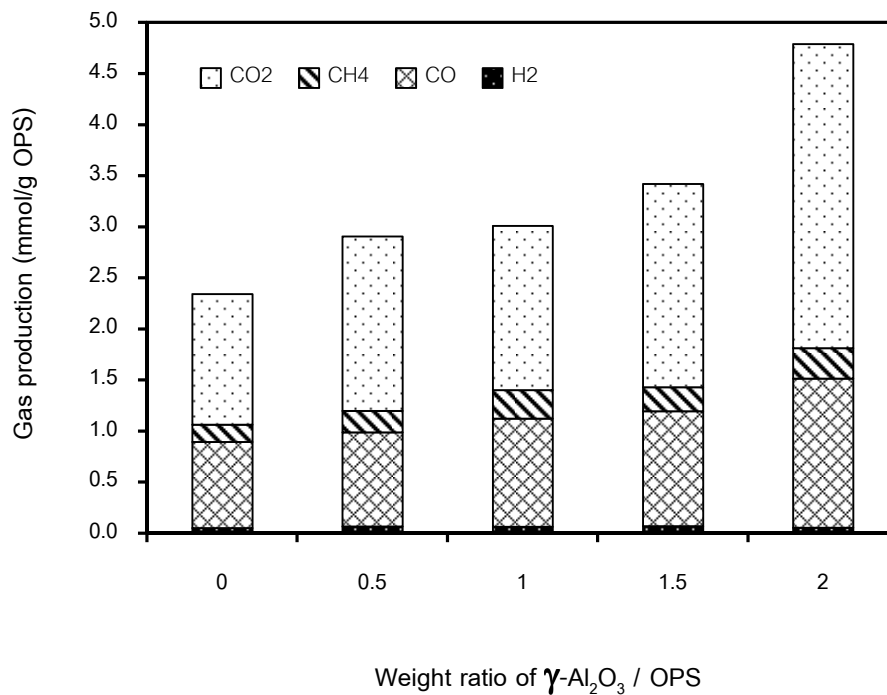
เบดเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างของแข็งที่ประกอบด้วยถ่านชาร์และแกมมาอะลูมินา กับสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างการสลายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) ขั้นที่สองของสารระเหยให้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กหรือแก๊ส ผลิตภัณฑ์มากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มความสูงของเบดทำให้ความดันไอของสารระเหยภายในรูพรุนของถ่านชาร์และพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาสูงขึ้น ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาการรีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Re-polymerization) ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์มากขึ้น ดังสมการที่ 4.2 (Pather และคณะ, 1996)



เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มที่มากกว่า 1 นั้น ส่งผลให้ได้รับร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลง อาจเนื่องจากเบดที่มีปริมาณมากขึ้นส่งเสริมให้เกิดการสะสมของความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดได้ดีกว่าปฏิกิริยารีพอลิเมอร์ไรเซชัน ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นและผลิตภัณฑ์ของแข็งและถ่านชาร์ลดลง เมื่อพิจารณาการเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันพบว่าร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานในการสลายตัวของกะลาปาล์มทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยออกมามากเพราะส่งเสริมปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นที่สองด้วย ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งน้อยลง

เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างคาร์บอนในเซชันของกะลาปาล์ม ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเปรียบเทียบระหว่างการมีและไม่มีแกมมาอะลูมินาเป็นวัสดุเบด แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างแกมมาอะลูมินากับกะลาปาล์มให้ผลของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์ม เนื่องจากการใส่แกมมาอะลูมินาทำหน้าที่เป็นวัสดุเบดที่ช่วยในการทำปฏิกิริยาการแตกตัวของสารระเหยที่ได้จากคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม ให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น (Uddin และคณะ, 2008) โดยการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มาจากการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของสารกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) และสารกลุ่มอีเทอร์ (ether group) (Fu และ

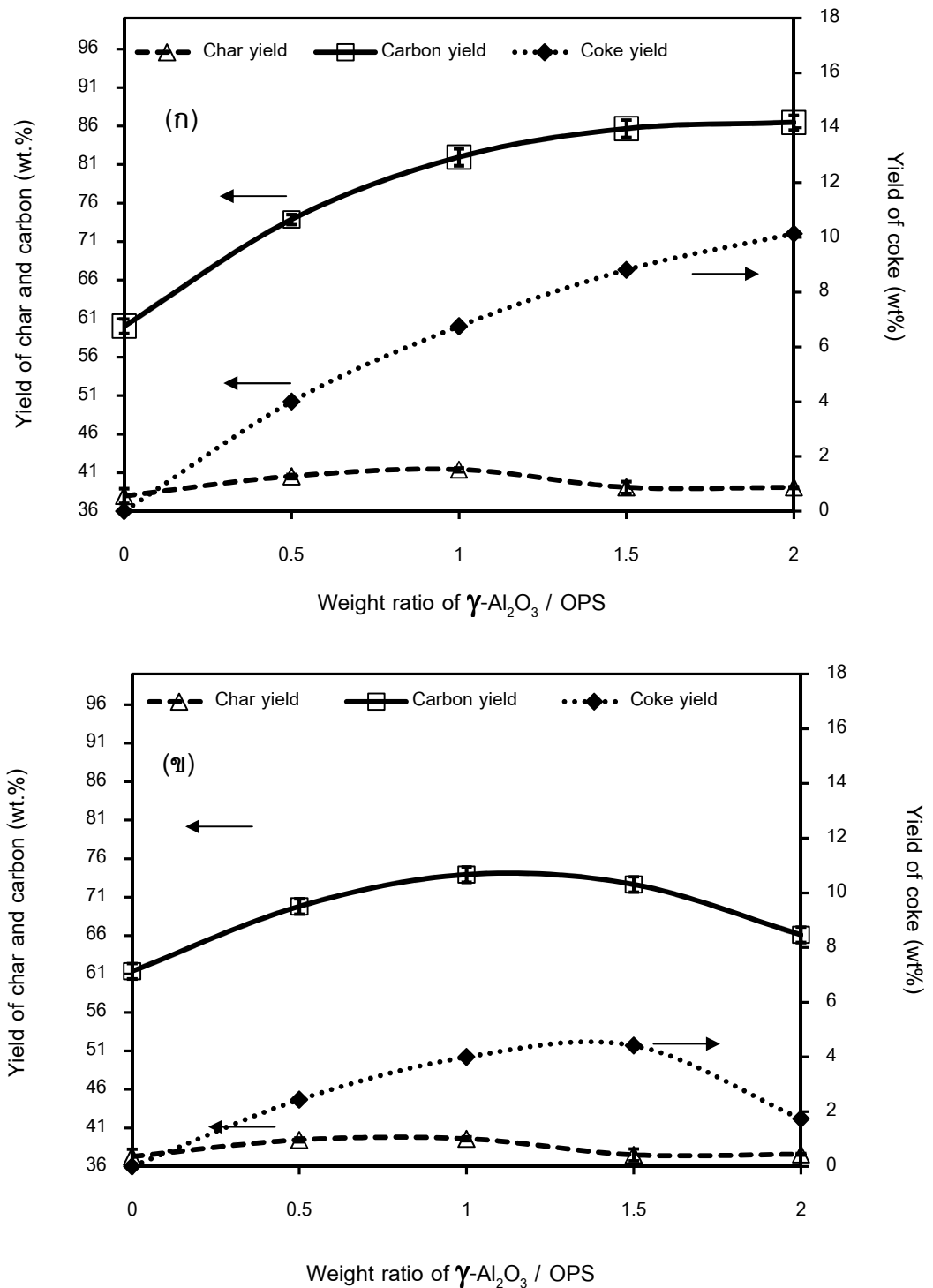
คณะ, 2012) การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากการแตกตัวของพันธะ C - O จากปฏิกิริยาการแตกตัวและปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (reforming) ของสารกลุ่มคาร์บอนิลและคาร์บอกซิล (carboxyl group) ส่วนมีเทนเพิ่มขึ้นจากการแตกตัวของกลุ่มเมทอกซิล (-O-CH₃, methoxyl group) (Cao และคณะ, 2013)



รูปที่ 4.7 ผลของแกมมาอะลูมินาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

เมื่อพิจารณาถึงร้อยละผลได้ของคาร์บอนจากคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา โดยร้อยละของคาร์บอนคำนวณมาจากสองส่วนคือ คาร์บอนจากถ่านชาร์และคาร์บอนจากการเกิดไค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มจาก 0 ถึง 1 นั้นให้ร้อยละของคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มนั้นทำให้ได้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์สูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวและรีพอลิเมอไรเซชันของสารระเหยที่ปลดปล่อยระหว่างคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มเป็นการเพิ่มพื้นที่ของตำแหน่งกรด ทำให้มีการเกิดไค้กมากขึ้น (Hosokai และคณะ, 1996) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มจนมากกว่า 1 พบว่า ร้อยละผลได้ของคาร์บอนเพิ่มนั้นขึ้นอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ที่อัตราส่วนดังกล่าวลดลง แต่เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของไค้ก พบว่ามีค่าสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเกิดไค้กขึ้นกับพื้นที่ผิวของแกมมาอะลูมินาเท่านั้น

แต่เมื่อพิจารณาการเพิ่มอุณหภูมิในคาร์บอนในเซชันจาก 400 เป็น 450 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 4.8 (ข) พบว่า ร้อยละผลได้ของคาร์บอนลดลงทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของทั้งร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และปริมาณไค้กที่เกิดบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินา เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในคาร์บอนในเซชันนั้นเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุเบด ทำให้สารระเหยที่ปลดปล่อยจากการสลายตัวของกะลาปาล์มนั้นถูกสลายตัวให้เป็นสารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้มากขึ้น



รูปที่ 4.8 ผลของแกมมาอะลูมินาต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ ร้อยละผลได้ของคาร์บอน และร้อยละผลได้ของโค้ก (ก) อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 400 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 450 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในคาร์บอนในเซชัน 30 นาที พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มส่งผลให้ปริมาณธาตุคาร์บอนในถ่านชาร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณธาตุออกซิเจนลดลง ซึ่งส่งผลให้ได้ค่าความร้อนของถ่านชาร์สูงขึ้นเทียบกับกรณีคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลในแนวทางเดียวกันกับการเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากการมีแกมมาอะลูมินาจึงส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารระเหยและความร้อนที่สะสมในวัสดุเบดช่วยเพิ่มอัตราการสลายตัวของถ่านชาร์เป็นสารระเหยเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้ถ่านชาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินานั้นมีค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนอะตอมระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนพบว่า คาร์บอนในเซชันระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินาส่งผลให้ได้อัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนลดลงจาก 0.72 เป็น 0.54 ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่าถ่านชาร์มีการสูญเสียสารระเหยเพิ่มขึ้นจึงมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านซาร์ที่ได้จากคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในคาร์บอนในเซชัน 30 นาที

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์ม				
	0	0.5	1	1.5	2
อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400 องศาเซลเซียส					
คาร์บอน	72.71	74.39	73.88	73.76	73.26
ไฮโดรเจน	3.95	4.47	4.10	3.95	4.53
ไนโตรเจน	0.71	0.80	0.71	0.62	0.86
ออกซิเจน***	22.63	20.34	21.31	21.67	21.35
ค่าความร้อน (kcal/kg)	6,900.70	7,059.69	7,089.47	7,032.64	7,001.89
อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 450 องศาเซลเซียส					
คาร์บอน	75.76	75.04	75.76	77.61	76.07
ไฮโดรเจน	3.95	4.41	4.56	4.02	4.40
ไนโตรเจน	0.39	0.82	0.33	0.59	0.37
ออกซิเจน***	20.00	19.73	19.35	17.78	19.16
ค่าความร้อน (kcal/kg)	7,211.85	7,303.39	7,355.48	7,558.51	7,481.00

**ร้อยละแบบไม่คิดเถ้า (dry ash free basis)

***ออกซิเจน = 100 - ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นออกซิเจน

4.4 การนำกลับพลังงาน (Energy recovery) ในคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา

จากการศึกษาผลของแกมมาอะลูมินาต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และผลได้ของคาร์บอนพบว่าที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 400 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และร้อยละผลได้ของคาร์บอนสูงที่สุด จึงเลือกอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการศึกษาการนำกลับพลังงานในคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา

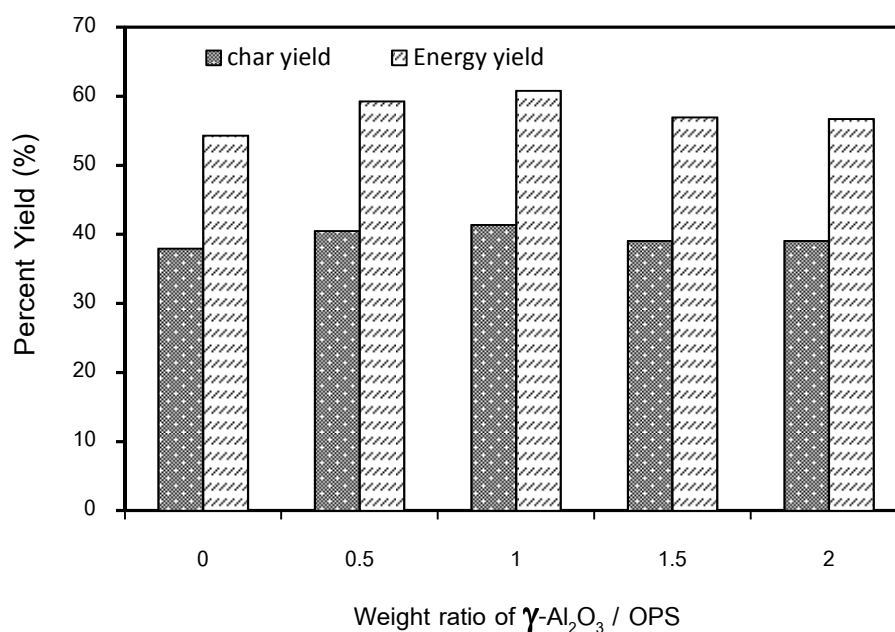
ตารางที่ 4.6 แสดงการนำกลับพลังงานความร้อน (Heating value) ที่ได้จากถ่านชาร์และโค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันร่วมกับกะลาปาล์มที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยพบว่าคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินาสามารถนำกลับพลังงานที่สูญเสียไปกับการปลดปล่อยสารระเหยให้อยู่ในรูปโค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินา ซึ่งการนำกลับพลังงานดังกล่าวเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการคาร์บอนในเซชัน นอกจากนี้คาร์บอนที่อยู่ในรูปของโค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือแหล่งความร้อนร่วมกับสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอบิดได้อีกด้วย (Hosokai และคณะ, 1996) และเป็นแหล่งพลังงานร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น

รูปที่ 4.9 แสดงร้อยละผลได้และร้อยละของพลังงานของถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างแกมมาอะลูมินากับกะลาปาล์มที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ พบว่า การมีแกมมาอะลูมินาร่วมในการคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มนั้นให้ทั้งร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และร้อยละของพลังงานสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการมีแกมมาอะลูมินาเป็นวัสดุเบดร่วมในคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความหนาแน่นทางพลังงานสูงขึ้น และพบว่าภาวะที่ให้ร้อยละผลได้ของพลังงานสูงที่สุดคือ การคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินาด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 1 โดยให้ค่าร้อยละพลังงานเพิ่มจาก 54.34 เป็น 60.82 ซึ่งคิดเป็นการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 15.60 ดังนั้นภาวะดังกล่าวจึงเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม

ตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานความร้อน (Heating value) ที่ได้จากถ่านชาร์และโค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันร่วมกับกะลาปาล์มที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

การนำกลับพลังงานจากการเผาไหม้	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์ม				
	0.0:1.0	0.5:1.0	1.0:1.0	1.5:1.0	2.0:1.0
ถ่านชาร์ (kcal/kg-char)	6,900.70	7,059.69	7,089.47	7,032.64	7,001.89
โค้ก (kcal/kg-coke/Al ₂ O ₃)*	0.00	475.91	435.51	378.95	327.24

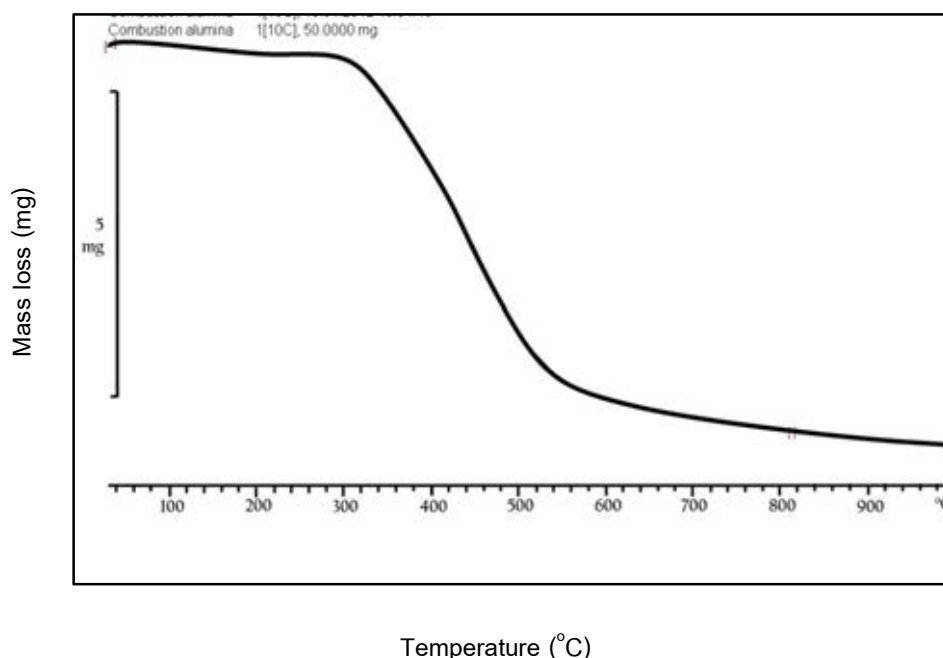
*โค้กบนพื้นผิวอะลูมินาโดยไม่คิดความร้อนของแกมมาอะลูมินา



รูปที่ 4.9 แสดงร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และร้อยละของพลังงานที่ได้จากถ่านชาร์เมื่อผ่านคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้แกมมาอะลูมินาและใช้แกมมาอะลูมินาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ

4.5 การนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำในคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินา

การนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำในคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างแกมมาอะลูมินากับกะลาปาล์ม ศึกษาโดยนำแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันแล้วมาใช้ซ้ำโดยไม่ต้องผ่านการเผา (Calcination) และผ่านการเผาในอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกมมาอะลูมินานั้นเลือกมาจากการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของโค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินา โดยทำการทดลองภายใต้บรรยากาศของแก๊สออกซิเจนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า โค้กที่เกาะบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาสามารถถูกเผาไหม้ได้ในช่วงอุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส จึงนำอุณหภูมิช่วงดังกล่าวไปทำการทดลองศึกษาการนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำในคาร์บอนในเซชันของกะลาปาล์ม ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 1 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7 และ



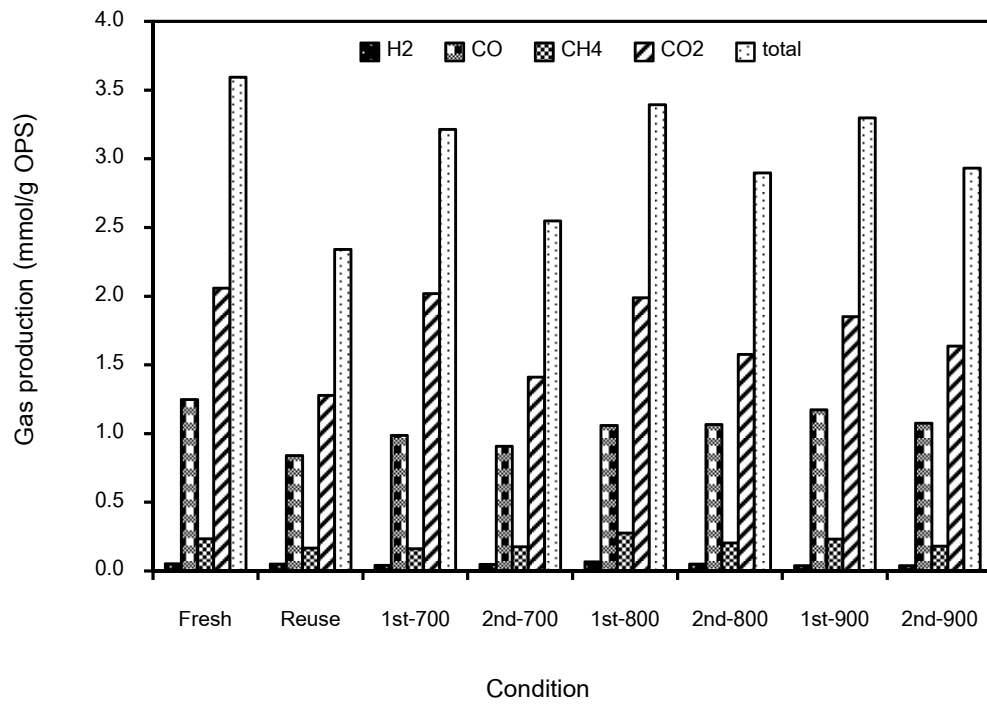
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินา ภายใต้บรรยากาศของแก๊สออกซิเจน ด้วยอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที

รูปที่ 4.11 พบว่า การนำแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันร่วมกับกะลาปาล์มมาใช้ซ้ำให้ร้อยละผลได้ของโค้กและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากแกมมาอะลูมินาดังกล่าวมีโค้กเกาะบนพื้นผิวอยู่แล้วทำให้ตำแหน่งกรดบนพื้นผิวลดลง ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดโค้กบนพื้นผิวลดลงด้วยและทำให้แกมมาอะลูมินาไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของสารระเหยที่ปลดปล่อยในระหว่างคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม และเมื่อพิจารณาแกมมาอะลูมินาที่ใช้แล้วและผ่านการเผาภายใต้บรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 700 เป็น 800 องศาเซลเซียสนั้นให้ร้อยละผลได้ของโค้กและแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการเผาที่ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงนั้น ไม่สามารถเผาโค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาออกได้หมดเมื่อเทียบกับการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เมื่อนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ใหม่นั้นจึงมีพื้นผิวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง แต่เมื่อเผาแกมมาอะลูมินาที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าให้ร้อยละของโค้กน้อยกว่าการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาลดลง (Ros และคณะ, 2013) ทำให้การเกิดปฏิกิริยาการเกิดโค้กบนพื้นผิวลดลงและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการสลายตัวของสารระเหยลดลง นอกจากนี้พบว่าแกมมาอะลูมินาที่ผ่านการใช้งานและการเผาจำนวน 2 ครั้งจะให้ผลได้ของโค้กและแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากการสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาลดลง (Vitolo และคณะ, 2001)

ตารางที่ 4.7 การนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำต่อร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ คาร์บอน และโค้ก ตามลำดับ จากคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์ม และแกมมาอะลูมินา ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 1:1 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

การนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ใหม่	ร้อยละโดยน้ำหนักของถ่านชาร์	ร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอน	ร้อยละโดยน้ำหนักของโค้ก
แกมมาอะลูมินาใหม่ (Fresh)	41.40	81.97	7.12
แกมมาอะลูมินาที่ผ่านการใช้แล้ว			
Reuse	39.94	67.69	1.63
1 st - 700°C	40.67	71.80	2.98
2 nd - 700°C	40.68	69.49	1.92
1 st - 800°C	42.54	80.69	5.69
2 nd - 800°C	40.51	70.67	2.58
1 st - 900°C	39.80	75.53	5.22
2 nd - 900°C	39.74	65.98	0.99

ความหมายของสัญลักษณ์ 1st -700°C คือ แกมมาอะลูมินาที่นำกลับมาใช้ซ้ำครั้งที่ 1 โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของอากาศ



รูปที่ 4.11 การนำแก๊มาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ จากคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแก๊มาอะลูมินา ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 1:1 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกลมมาอะลูมินา โดยศึกษาผลของปัจจัย ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแกลมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์ม การนำแกลมมาอะลูมินากลับมาใช้ใหม่ และการนำกลับคาร์บอนที่สูญเสียจากการปลดปล่อยสารระเหยในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1.1 กะลาปาล์มมีร้อยละของสารระเหยสูงถึงร้อยละ 73.04 และมีร้อยละคาร์บอนเพียงร้อยละ 16.98 เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุพบว่า กะลาปาล์มมีปริมาณธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 46.02 และมีปริมาณธาตุออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 47.68 ทำให้กะลาปาล์มมีค่าความร้อนต่ำ ซึ่งคิดเป็นค่าความร้อนเพียง 4,825.15 กิโลแคลอรีต่อ กิโลกรัม จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง เมื่อศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของกะลาปาล์มภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนพบว่า กะลาปาล์มมีการสลายตัวสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส จึงเลือกช่วงอุณหภูมิดังกล่าวทำการทดลองคาร์บอนไนเซชันต่อไป
- 5.1.2 การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันส่งผลให้ได้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลง และส่งผลให้ถ่านชาร์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวปริมาณและธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น ปริมาณสารระเหยและธาตุออกซิเจนที่ลดลง ส่งผลให้ได้ค่าความร้อนของถ่านชาร์มากขึ้น ซึ่งถือเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น
- 5.1.3 การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนในคาร์บอนไนเซชันส่งผลต่อร้อยละผลได้และคุณภาพทางเชื้อเพลิงของถ่านชาร์เพียงเล็กน้อย แต่ส่งผลอย่างมากต่อลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์ที่ได้ โดยถ่านชาร์ที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันที่อัตราการให้ความร้อนสูงจะให้พูนที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ

- 5.1.4 คาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างกะลาปาล์มและแกมมาอะลูมินาให้ผลได้ของคาร์บอนที่มากกว่าคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มเพียงอย่างเดียว ในการทดลองอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 1 ให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ที่มากที่สุดถึงร้อยละ 41.4 และให้ร้อยละผลได้ของคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 81.97 เมื่อคำนวณการนำกลับพลังงานจากคาร์บอนในเซชันร่วมระหว่างแกมมาอะลูมินาและกะลาปาล์มพบว่า สามารถนำกลับพลังงานจากผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ 7,089.47 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และนำกลับพลังงานจากไค้กบนแกมมาอะลูมินาอีก 585.95 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมแกมมาอะลูมินา
- 5.1.5 การศึกษาการนำแกมมาอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำ พบว่าแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนในเซชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก 1 ครั้ง เมื่อผ่านการเผาภายใต้บรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์เท่ากับ 41.04 และร้อยละของคาร์บอนเท่ากับ 80.69 ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับใกล้เคียงกับการใช้แกมมาอะลูมินาใหม่
- 5.1.6 ถ่านชาร์และไค้กบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาที่ได้จากคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทดแทนการใช้ถ่านหินได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาโดยเปลี่ยนชนิดของชีวมวลชนิดอื่น เช่น ฟางข้าว แกลบ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทยเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของชีวมวลและนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้
- 5.2.2 จากงานวิจัยดังกล่าวสามารถนำคาร์บอนบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินาได้ ดังนั้นควรนำคาร์บอนดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในด้านเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของทาร์ในปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันได้
- 5.2.3 ได้กบนพื้นผิวแกมมาอะลูมินาที่ได้ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือแหล่งความร้อนสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเบด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัญญา บุญยาเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ:

สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

การดูดซับ. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา:

<http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/6169/9/Chapter2.pdf>. [29 มิถุนายน 2556].

นคร ทิพยาวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท, 2553.

นฤมล ชูบัวทอง. ผลขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลต่อไพโรไลซิสและการเผาไหม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

ประโยชน์ ศรีสุภานันต์. การศึกษาคาร์บอนในเศษชั้นของถ่านหินและผลิตภัณฑ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

สุภชิตา เกริกไกรวัล. แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำของทะเลสาบปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

สุดาวลัยย์ ดำหนก. ผลของวัสดุเบดต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งจากทอริแฟกชันของชีวมวล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ถ่าน: การผลิตที่ถูกต้องวิธีและประโยชน์

สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2554.

ศิวพรรณ มหาสุภาพ. ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวลในเบดนิ่งสองชั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. ชีวมวล. มุลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2549.

อลิศรา นิติวัดมณะ. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มแมคาเดเมียโดยการกระตุ้นทางกายภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ภาษาอังกฤษ

Angin, D. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. Bioresource Technology 128(2013): 593-597.

Borrego, A.G., Garavaglia, L., and Kalkreuth W.D. Characteristics of high heating rate biomass chars prepared under N₂ and CO₂ atmosphere. International Journal of Coal Geology 77(2009): 409-415.

Brunn, E.W., Nielsen, H.H., Ibrahim, N., Egsgaard, H., Ambus, P., Jensen, P.A., and Johansen, K.D. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil. Biomass and Bioenergy 35(2011): 1182-1189.

Carrier, M., Hugo, T., Gorgens, J., and Knoetze, H. Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 90(2011): 18-26.

Cheng, J. Biomass to Renewable Energy Process. New York: CRC Press Taylor and Francis group, 2010.

Demirbas, A. Effect of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 72(2004): 243-248.

Elyounssi, K., Blin, J., and Halim, M. High yield charcoal production by two-step pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 87(2010): 138-143.

- Fu, P., Hu, S., Xiang, J., Sun, L., Su, S., and Wang, J. Evaluation of porous structure development of chars from pyrolysis of rice straw: Effect of pyrolysis temperature and heating rate. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 98(2012): 177-183.
- Fu, P., Hu, S., Xiang, J., Sun, L., Su, S., and An, S. Study on the gas evolution and char structural change during pyrolysis of cotton stalk. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 97(2012): 130-136.
- Hosokai, J., Hayashi, J.-I., Kobayashi, Y., Kuramoto, C.-Z., Li, C.-Z., and Chiba, T. Spontaneous generation of tar decomposition promoter in a biomass steam reformer. Chemical Engineering Research and Design 83(2005): 1093-1102.
- Idris, S.S., Rahman, N.A., Ismail, K., Alias, A.B., Rashid, Z.A., and Aris, M.J. Investigation on the thermochemical behavior of low rank Malaysian coal, oil palm biomass and their blends during pyrolysis via thermogravimetric analysis (TGA). Bioresource Technology 101(2010) 4584-4592.
- Inagaki, M., Park, K.C., and Endo, M. Carbonization under pressure. New Carbon Materials 26(2010): 409-420.
- Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S., and Xai, H. 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(2008): 190-198.
- Mohan, D., Pittman, C.U., and Steele, P. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. Energy and Fuels 20(2006): 848-889.
- Neves, D., Thunman, H., Matos, A., Tarelho, L., and Barea, A.G. Characterization and prediction of biomass pyrolysis product. Progress in Energy and Combustion Science 37(2011): 611-630.
- Ozcimen, D., and Mericboyu, A.E. A study on the carbonization of grapeseed and chestnut shell. FUEL PROCESSING TECHNOLOGY 89(2008): 1041-1046.

- Pather, T.S., and Al-Masry, W.A. The influence of bed depth on secondary reactions during slow pyrolysis of coal. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 37(1996): 83-94.
- Phan, A.N., Sharafi, V., and Swithenbank, J. Effect of bed depth on characterization of slow pyrolysis products. Fuel 88(2009): 1381-1387.
- Phan, A.N., Ryu, C., Sharifi, V.N., and Swithenbank, J. Characterisation of slow pyrolysis products from segregated wastes for energy production. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 81(2008): 65-71.
- Ros, S.D., Coutinho, E.B, and Schwaab, M. Modeling the effects of calcinations conditions on the physical and chemical properties of transition alumina catalysts. Materials characterization 80(2013): 50-61.
- Uddin, M.A., Tsuda, H., Wu, S., and Sasaoka, E. Catalytic decomposition of biomass tars with iron oxide catalysts. Fuel 87(2008): 451-459.
- Uemura, Y., Omar, W.N., Tsutsui, T., and Yusup, S.B. Torrefaction of oil palm wastes. Fuel 90(2011): 2585-2591.
- Varma, A., and Behera, B. Green Energy Biomass Processing and Technology. New Delhi: Capital publishing company, 2003.
- Vitolo, S., Bresci, B., Seggiani, M., and Gallo, M.G. Catalytic upgrading of puolytic oils over HZSM-5 zeolite: behavior of the catalyst when used in repeated upgrading cycles. Fuel 80(2001): 17-26.
- Worasuwannarak, N., Potisri, P., and Tanthapanichakoon, W. Upgrading of biomass by carbonization in hot compressed water. Songklanakarin Journal of Science Technology 28(2006) 1049-1057.

Yan, Q., Toghiani, H., Yu, F., Cai, Z., and Zhang J. Effects of pyrolysis conditions on yield of bio-chars from pine chips. Forest Products Journal 65(2011): 367-371.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของถ่านชาร์

$$\text{ค่าร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ (\% Char yield)} = \frac{M_{Ch}}{M_R} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } M_R &= \text{น้ำหนักของกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดลอง} \\ M_{Ch} &= \text{น้ำหนักของถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์} \end{aligned}$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของคาร์บอน

$$\text{น้ำหนักของคาร์บอนบนพื้นผิวของแกมมาอะลูมินา} = (M_{A,F} - M_{A,I})$$

$$\text{น้ำหนักของคาร์บอนทั้งหมด} = (M_{CC} + M_{CA})$$

$$\text{ค่าร้อยละผลได้ของคาร์บอน (\% Carbon yield)} = \frac{M_C}{M_R} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } M_{CA} &= \text{น้ำหนักคาร์บอนบนผิวแกมมาอะลูมินา} \\ M_{A,I} &= \text{น้ำหนักแกมมาอะลูมินาก่อนคาร์บอไนซ์} \\ M_{A,F} &= \text{น้ำหนักแกมมาอะลูมินาหลังคาร์บอไนซ์} \\ M_C &= \text{น้ำหนักคาร์บอนทั้งหมดหลังการคาร์บอไนซ์} \\ M_R &= \text{น้ำหนักของคาร์บอนในกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดลอง} \\ M_{CC} &= \text{น้ำหนักของคาร์บอนในถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง

อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

เวลาในการทดลอง 30 นาที

อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแกมมาอะลูมินาต่ออะลาปาล์ม = 1:1

การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักของอะลาปาล์มเริ่มต้น} = 3.0000 \text{ g}$$

$$\text{น้ำหนักของแกมมาอะลูมินาเริ่มต้น} = 3.0203 \text{ g}$$

$$\text{น้ำหนักของถ่านชาร์ที่ได้} = 1.2384 \text{ g}$$

$$\text{น้ำหนักของแกมมาอะลูมินาหลังการคาร์บอนไนซ์} = 3.2434 \text{ g}$$

$$\text{น้ำหนักของคาร์บอนบนพื้นผิวแกมมาอะลูมินา} = 3.2434 - 3.0203$$

$$= 0.2231 \text{ g}$$

$$\text{ร้อยละคาร์บอนในอะลาปาล์ม} = 46.02$$

$$\text{น้ำหนักคาร์บอนในอะลาปาล์ม} = \frac{46.02 \times 3}{100}$$

$$= 1.38 \text{ g}$$

$$\text{ร้อยละคาร์บอนในถ่านชาร์} = 73.88$$

$$\text{น้ำหนักคาร์บอนในถ่านชาร์} = \frac{73.88 \times 1.2384}{100}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.91 \text{ g} \\
 \text{น้ำหนักของคาร์บอนทั้งหมดหลังคาร์บอนไนท์} &= 0.91 + 0.2231 \\
 &= 1.1331 \text{ g} \\
 \text{ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์} &= \frac{1.2384}{3.0000} \times 100 \\
 &= 41.28 \% \\
 \text{ร้อยละผลได้ของคาร์บอน} &= \frac{1.1331}{1.38} \times 100 \\
 &= 82.10 \%
 \end{aligned}$$

3. ศักดิ์ของถ่านหิน (Coal rank)

ศักดิ์ของถ่านหินเป็นการคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชื้อเพลิงที่แสดงถึงปริมาณที่เชื้อเพลิงเผาไหม้บนตะแกรงต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่เผาไหม้เหนือตะแกรง โดยอัตราส่วนเชื้อเพลิงบอกศักดิ์ของถ่านหินโดยประมาณดังตารางที่ ก. 1

$$\text{Fuel ratio} = \frac{\text{Fix carbon (FC)}}{\text{Volatile matter (VM)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของกะลาปาล์ม

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละความชื้น} &= 7.40 \\
 \text{ร้อยละเถ้า} &= 2.58 \\
 \text{ร้อยละสารระเหย} &= 73.04
 \end{aligned}$$

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 16.98$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{Fuel ratio} = \frac{16.98}{73.04} = 0.23$$

ตารางที่ ก. 1 แสดงศักดิ์ของถ่านหิน (Coal rank)

ศักดิ์ของถ่านหิน	อัตราส่วนเชื้อเพลิง
แอนทราไซต์ (Antracite)	10
เซมิแอนทราไซต์ (Semiantracite)	6 – 10
เซมิบิทูมินัส (Semibituminous)	3 – 7
บิทูมินัส (Bituminous)	0.5 - 3

4. การคำนวณอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และ ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C)

ตัวอย่างการคำนวณ

จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของกะลาปาล์ม

$$\text{ร้อยละคาร์บอน} = 46.02$$

$$\text{ร้อยละไฮโดรเจน} = 6.02$$

$$\text{ร้อยละไนโตรเจน} = 0.28$$

$$\text{ร้อยละออกซิเจน} = 47.68$$

$$\text{น้ำหนักกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดลอง} = 3 \text{ g}$$

ปริมาณธาตุในกะลาปาล์มที่ใช้ในการทดลอง

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณคาร์บอน} &= \frac{46.02 \times 3}{100} \\
 &= 1.38 \text{ g} \\
 \text{ปริมาณไฮโดรเจน} &= \frac{6.02 \times 3}{100} \\
 &= 0.18 \text{ g} \\
 \text{ปริมาณไนโตรเจน} &= \frac{0.28 \times 3}{100} \\
 &= 8.4 \times 10^{-3} \text{ g} \\
 \text{ปริมาณออกซิเจน} &= \frac{47.68 \times 3}{100} \\
 &= 1.43 \text{ g}
 \end{aligned}$$

มวลอะตอมของธาตุ

คาร์บอน = 12; ไฮโดรเจน = 1; ออกซิเจน = 16

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร} \quad \text{mole} &= \frac{\text{mass}}{\text{atomic mass}} \\
 1 \text{ mole} &= 6.02 \times 10^{23} \text{ atom}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนโมลของคาร์บอน} &= \frac{1.38}{12} = 0.115 \\
 \text{จำนวนอะตอมของคาร์บอน}(N_C) &= 0.115 \times (6.02 \times 10^{23}) \text{ อะตอม} \\
 \text{จำนวนโมลของไฮโดรเจน} &= \frac{0.18}{1} = 0.18 \\
 \text{จำนวนอะตอมของไฮโดรเจน}(N_H) &= 0.18 \times (6.02 \times 10^{23}) \text{ อะตอม} \\
 \text{จำนวนโมลของออกซิเจน} &= \frac{1.43}{16} = 0.089 \\
 \text{จำนวนอะตอมของออกซิเจน}(N_O) &= 0.089 \times (6.02 \times 10^{23}) \text{ อะตอม}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราส่วนอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน} &= \frac{N_H}{N_C} \\
 &= \frac{0.18 \times (6.02 \times 10^{23})}{0.115 \times (6.02 \times 10^{23})} \\
 &= 1.56
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราส่วนอะตอมของออกซิเจนต่อคาร์บอน} &= \frac{N_O}{N_C} \\
 &= \frac{0.089 \times (6.02 \times 10^{23})}{0.115 \times (6.02 \times 10^{23})} \\
 &= 0.77
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

แก๊สโครมาโทโตกราฟ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่สามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สเฟสได้ที่อุณหภูมิหนึ่งและมีความเสถียรที่อุณหภูมินั้น โดยอาศัยการพาสารผสมที่ต้องการแยกเข้าไปในส่วนคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ในการพาสารเคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เพื่อเข้าสู่เครื่องวัด (Detector) จากนั้นเครื่องวัดจะทำการตรวจวัดและส่งสัญญาณไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder) ต่อไป แก๊สโครมาโตกราฟมีข้อดีมากมาย เช่น ใช้แยกสารต่าง ๆ ได้ดี มีค่าการแยกสูง มีความไวสูง สามารถใช้วิเคราะห์สารบางชนิดได้ถึงระดับ ppm และ ppb ทำการวิเคราะห์ได้ง่ายและราคาไม่แพง เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องโครมาโตกราฟ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 Gas chromatograph (GC) ในการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์

1. ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องโครมาโตกราฟ

1.1 แก๊สพาและตัวควบคุมการไหล (Flow controller)

แก๊สพาทำหน้าที่ในการพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอหรืออยู่ในแก๊สเฟสแล้วเคลื่อนที่ไปสู่คอลัมน์ โดยแก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สพาเป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ แก๊สพาควรมีสมบัติที่สำคัญคือ เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่ที่น้อย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน แก๊สฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

1.2 คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการแยกสารของเทคนิคโครมาโตกราฟี โดยเมื่อไอของสารผสมในสารตัวอย่างและแก๊สพาเคลื่อนที่มาในคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกัน ดังนั้นโครมาโตแกรมของสารที่แยกได้จะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์ โดยคอลัมน์ในเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีมีสองชนิด ได้แก่ แพ็คคอลัมน์ (Packed column) และ แคปิลลารีคอลัมน์ (Capillary column)

1.3 ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์ถือเป็นส่วนสำคัญที่สุดของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยดีเทคเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดความแตกต่างทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของสารที่ต้องการวิเคราะห์กับแก๊สพา ดังนั้นดีเทคเตอร์ที่ดีควรมีลักษณะเฉพาะในการวิเคราะห์ ได้แก่ ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity) มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity) ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณมีความแม่นยำ ความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง มีเสถียรภาพ (Stability) และความเที่ยง (Reproducibility)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ ทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบ TCD

ดีเทคเตอร์แบบ TCD เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้กันทั่วไปมานานแล้ว เพราะเป็นเครื่องที่ทำงานราคาถูก และใช้ได้ดี หลักการของดีเทคเตอร์ชนิดนี้คือการอาศัยพื้นฐานของวัตถุที่ร้อนจะมีการสูญเสียความร้อนไปด้วยอัตราเร็วของการสูญเสียความร้อนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแก๊สที่อยู่รอบๆ จากอัตราการสูญเสียความร้อนนี้ สามารถนำไปใช้วัดหรือหาองค์ประกอบของแก๊สได้

ภาคผนวก ค

การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

ตาราง ค1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard, STD)

ชนิดแก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ	ร้อยละโดยปริมาตร (Balance in N ₂)
ไฮโดรเจน (H ₂)	36,592.9	1.00
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	1,895.4	1.00
มีเทน (CH ₄)	7,492.7	1.00
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	2,597.9	1.00

ตัวอย่างการคำนวณ

การทดลองการคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์ม ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน

10 องศาเซลเซียสต่อนาที น้ำหนักกะลาปาล์มเริ่มต้น 3.2321 กรัม

อัตราการไหลของแก๊ส เท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาในการเก็บแก๊สถุงที่ 1 40 นาที

ปริมาตรแก๊สในถุงที่ 1 เท่ากับ 1,600 มิลลิลิตร

เวลาในการเก็บแก๊สถุงที่ 2 และ 3 15 นาที

ปริมาตรแก๊สในถุงที่ 2 และ 3 เท่ากับ 600 มิลลิลิตร

ตาราง ค2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละถุง

1) ถุงที่ 1 (40 นาทีแรก)

ชนิดแก๊ส	พื้นที่	% เทียบกับ STD	ปริมาตรแก๊สในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	4,493.3	0.1228	1.9647	0.0803
CO	4,558.1	2.4048	38.4771	1.5734
CH ₄	0.0	0.0000	0.0000	0.0000
CO ₂	8,540.6	3.2875	52.6000	2.1510

2) ถุงที่ 2 (15 นาที)

ชนิดแก๊ส	พื้นที่	% เทียบกับ STD	ปริมาตรแก๊สในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	20,568.0	0.5621	3.3724	0.1379
CO	10,096.3	5.327	31.9604	1.3069
CH ₄	21,086.8	2.8145	16.8870	0.6905
CO ₂	21,540.7	8.2916	49.7495	2.3044

3) ถุงที่ 3 (15 นาที)

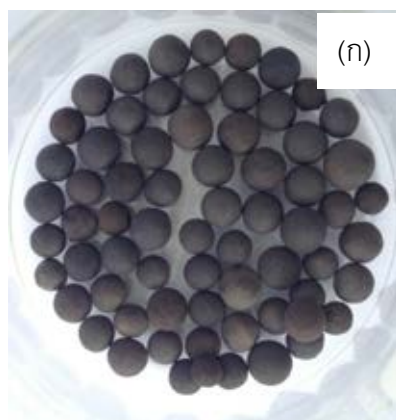
ชนิดแก๊ส	พื้นที่	% เทียบกับ STD	ปริมาตรแก๊สในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	16,004.0	0.4373	2.6241	0.1073
CO	3,249.7	1.1745	10.2871	0.4207
CH ₄	11,819.5	1.5775	9.4654	0.3871
CO ₂	8,360.5	3.2182	19.3090	0.7896

ดังนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ทั้งหมดในการทำปฏิกิริยา

ชนิดแก๊ส	จำนวนโมล (mmol)	จำนวนโมลต่อน้ำหนักกะลาปาล์ม (mmol / g OPS)
H ₂	0.3255	0.0542
CO	3.3011	0.5499
CH ₄	1.0776	0.1795
CO ₂	4.9750	0.8287

ภาคผนวก ง

ลักษณะทางกายภาพของแกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันร่วมกับกะลาปาล์ม



รูปที่ ง1 แกมมาอะลูมินาที่ผ่านคาร์บอนไนเซชันร่วมกับกะลาปาล์มที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกมมาอะลูมินาต่อกะลาปาล์ม (ก) อัตราส่วน 0.5:1.0 (ข) อัตราส่วน 1.0:1.0 (ค) อัตราส่วน 1.5:1.0 (ง) อัตราส่วน 2.0:1.0 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอัญรัตน์ กั่นดอก เกิดวันที่ 1 กันยายน 2530 ที่จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสามัคคีวิทยาคม จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553 และได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการนานาชาติ 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium (10th EMSES) ครั้งที่ 10 ที่จังหวัดอุบลราชธานี ระหว่างวันที่ 5-8 ธันวาคม 2555