

ผลของวัสดุเบดต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งจากการทอริแฟกชันของชีวมวล

นางสาวสุดาวัลย์ คำหนก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
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.

EFFECT OF BED MATERIALS ON PROPERTIES OF SOLID FUEL FROM BIOMASS
TORREFACTION

Miss Sudawan Damnok

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของวัสดุเบดต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งจาก ทอริแฟกชันของชีวมวล
โดย	นางสาวสุดาวัลย์ คำหนัก
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เวียบร้อยเจริญ)

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

สุดาวัลย์ คำหนก : ผลของวัสดุเบดต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งจากทอริรีแฟกชันของชีวมวล. (EFFECTS OF BED MATERIALS ON PROPERTIES OF SOLID FUEL FROM BIOMASS TORREFACTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.ประพันธ์ คูชดธาวา, 87 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการทอริรีแฟกชันชีวมวลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเขย่าขนาด 2 ลิตร ที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิ 200 -300 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ชี้เลื่อย และ ไม้กระถินยักษ์วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของวัสดุเบดต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทอริรีแฟกชันวัสดุเบดที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ททราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A อัตราส่วนของชีวมวลต่อวัสดุเบดเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลอง พบว่า การทอริรีแฟกชันร่วมกับวัสดุเบดให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งจากกระบวนการที่มีคุณภาพดีกว่าเทียบกับกรณีไม่ใช้วัสดุเบด โดยที่ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณสารระเหย ความชื้น องค์ประกอบออกซิเจนลดลงและมีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ใกล้เคียงถ่านหินบิทูมินัส นอกจากนี้พบอีกว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการ ทำให้ค่าร้อยละผลได้ของแข็งลดลง โดยไม้กระถินยักษ์จะให้ร้อยละผลได้ของแข็งน้อยกว่าชี้เลื่อย ภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ กรณีการทอริรีแฟกชันชี้เลื่อยร่วมกับวัสดุเบด 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งสูงถึง 30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ร้อยละผลได้ของของแข็งสูงกว่ากรณีไม้กระถินยักษ์ ปริมาณสารระเหยและองค์ประกอบออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ของของแข็งต่ำ และสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งใกล้เคียงถ่านหินบิทูมินัสมากที่สุด

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเชื้อเพลิง..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

5072641523 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS : TORREFACTION/ SAWDUST/ GIANT LEUCAENA / BED MATERIAL/
BIOMASS

SUDAWAN DAMNOK : EFFECTS OF BED MATERIALS ON PROPERTIES
OF SOLID FUEL FROM BIOMASS TORREFACTION. ADVISOR : ASST.
PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 87 pp.

Torrefaction is a process for improvement the properties of biomass as solid fuel. The process was operated under mild conditions 200-300°C, inert gas and atmospheric pressure. Experiments were carried out in a shaking reactor of approximately 2 liter. Sawdust and Giant leucaena were employed as biomass feedstock. This work focused on investigating effects of various bed materials, sand, zeolite 3A and zeolite 5A, on the torrefaction process with ratio of biomass to bed material of 1:1 by weight. It was found that biomass torrefaction with bed material produced solid product with higher energy density and heating value while lower moisture content, volatile content and oxygen content, in comparison with the absence of bed material. Moreover, it revealed that torrefied biomass exhibited solid-fuel properties were close to that of bituminous coal. In addition, an increase in temperature led to a decrease of solid yield, especially in case of giant leucaena. The optimal operating conditions for this work were sawdust torrefaction with zeolite 5A at temperature of 300 °C could produce solid fuel with the heating value of 30 MJ/Kg, higher mass yield, lower volatile matter and oxygen content.

Department :Chemical Technology..... Student's Signature

Field of Study :Fuel Technology..... Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ ตลอดจนให้ความคิดเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตรตานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ ดร. นคร วรสุวรรณรักษ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก และ นายรติ แสงบุญ ที่ให้คำแนะนำในด้านเกี่ยวกับเครื่องมือ ซ่อมแซมเครื่องมือ และช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลอง

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ให้การสนับสนุนทุนและเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ครอบครัวและเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดทั้งเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ชีวมวล.....	5
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล.....	5
2.1.2 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	9
2.1.3 ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	9
2.1.4 ข้อด้อยของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	9
2.1.5 ศักยภาพชีวมวลและการใช้ประโยชน์เชิงพลังงาน.....	10
2.1.6 ไม้กระถินยักษ์.....	12
2.1.7 ขี้เลื่อย.....	13
2.2 กระบวนการทอริแฟกชัน.....	14
2.2.1 นิยาม.....	14
2.2.2 กลไกการแตกตัวขององค์ประกอบชีวมวลในกระบวนการทอริแฟกชัน....	16
2.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ของกระบวนการทอริแฟกชัน.....	17

	หน้า
2.3 การวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุ.....	18
2.4 ค่าความร้อน.....	19
2.5 ซีโอไลต์.....	20
2.5.1 โครงสร้างของซีโอไลต์.....	21
2.5.2 ชนิดของซีโอไลต์.....	22
2.6 การดูดซับ.....	22
2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	28
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	28
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเขย่า.....	29
3.1.3 เครื่อง CHN Analyzer.....	31
3.1.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	31
3.1.5 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์.....	32
3.2 ชีวมวล วัสดุเบดและสารเคมี.....	32
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	33
3.3.1 การเตรียมชีวมวลและวัสดุเบด.....	33
3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล.....	34
3.3.3 การทอริแฟกชันชีวมวล.....	34
3.3.4 การทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบด.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
4.1 สมบัติเบื้องต้นของชีวมวล.....	38
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ.....	38
4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	42
4.1.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนด้วย TGA.....	44
4.2 การวิเคราะห์ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง.....	45
4.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	47

	หน้า
4.3.1 ค่าความร้อน.....	47
4.3.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้และร้อยละพลังงานที่ได้.....	49
4.4 สมบัติเชื้อเพลิงของแข็งของชีวมวล.....	52
4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	54
บทที่ 5 สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	57
5.1.1 ผลของอุณหภูมิในการทอริแฟกชันชีวมวล.....	57
5.1.2 ผลของวัสดุเบดในการทอริแฟกชันชีวมวล.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของชีวมวล.....	62
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....	66
ภาคผนวก ค สูตรคำนวณ.....	68
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดลอง.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของพืชพลังงาน.....	7
ตารางที่ 2.2 แสดงศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552.....	10
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของไม้โตเร็ว.....	13
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	14
ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	32
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซีลีเนียมและไม้กระถินยักษ์.....	39
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซีลีเนียมและไม้กระถินยักษ์เมื่อทอริฟฟิเคชันโดยไม่ใช้และใช้วัสดุเบตร่วมต่างกัน.....	39
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซีลีเนียมและไม้กระถินยักษ์.....	42
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซีลีเนียมและไม้กระถินยักษ์เมื่อทอริฟฟิเคชันโดยไม่ใช้และใช้วัสดุเบตร่วมต่างกัน.....	43

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างเซลลูโลส.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างลิกนิน.....	7
รูปที่ 2.4 ลำต้นไม้กระถินยักษ์.....	12
รูปที่ 2.5 แสดงสัดส่วนปริมาณของเศษวัสดุที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกระบวนการผลิต.....	14
รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดปฏิกิริยาแต่ละช่วงอุณหภูมิในกระบวนการทอริแฟกชัน.....	15
รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการแตกตัวของแต่ละองค์ประกอบทางเคมีแบ่งเป็นโซนต่างๆ...	16
รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพสรุปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการทอริแฟกชัน.....	18
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์.....	21
รูปที่ 2.10 แสดงกลไกของการดูดซับ.....	23
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เขย่า.....	29
รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล และเครื่องเขย่า...	30
รูปที่ 3.3 เครื่อง CNH Analyzer.....	31
รูปที่ 3.3 เครื่อง CNH Analyzer.....	31
รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	32
รูปที่ 3.5 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์.....	33
รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังการทดลองในงานวิจัย.....	36
รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์.	43
รูปที่ 4.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยน้ำหนักของซีลี้อยเมื่อทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ทราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A.....	44
รูปที่ 4.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์เมื่อทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ทราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A.....	45
รูปที่ 4.4 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งจากซีลี้อยที่เป็นวัตถุดิบ และซีลี้อยที่ทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ทราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A.....	46

รูปที่ 4.5 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งจากไม้กระถินยักษ์ที่เป็นวัตถุดิบ และไม้กระถินยักษ์ที่ทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ทราย ซีโอดี 3A และซีโอดี 5A.....	45
รูปที่ 4.6 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้และร้อยละของพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของของแข็งเมื่อทอริแฟกชันที่เล็ยด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ทราย ซีโอดี 3A และซีโอดี 5A.....	49
รูปที่ 4.7 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้และร้อยละของพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของของแข็งเมื่อทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ทราย ซีโอดี 3A และซีโอดี 5A.....	50
รูปที่ 4.8 แสดงสัดส่วนอะตอมของธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ของ ถ่านหินลิกไนท์ บิทูมินัส แอนทราไซด์ ผลิตภัณฑ์ของของแข็งเมื่อทอริแฟกชันที่ เล็ยด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบด และใช้วัสดุเบดเป็นทราย ซีโอดี 3A และซีโอดี 5A.....	52
รูปที่ 4.9 แสดงสัดส่วนอะตอมของธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ของ ถ่านหินลิกไนท์ บิทูมินัส แอนทราไซด์ ผลิตภัณฑ์ของของแข็งเมื่อทอริแฟกชันไม้ กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบด และใช้ วัสดุเบดเป็นทราย ซีโอดี 3A และซีโอดี 5A.....	53
รูปที่ 4.10 แสดงร้อยละขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทอริแฟกชันที่เล็ยด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบด และใช้ วัสดุเบดเป็นทราย ซีโอดี 3A และซีโอดี 5A.....	55
รูปที่ 4.11 แสดงร้อยละขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบด และใช้วัสดุเบดเป็นทราย ซีโอดี 3A และซีโอดี 5A.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลังงานนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาประเทศ ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล คิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ ส่วนอีก 14 เปอร์เซ็นต์ มาจากพลังงานชีวมวล ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีสำคัญสุดในขณะนี้ เมื่อเทียบสัดส่วนโดยเฉลี่ยประเทศที่พัฒนาแล้ว [Parikka et al., 2004] จะสัดส่วนการใช้พลังงานจากชีวมวลประมาณ 9-13 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานรวมทั้งหมด ในขณะที่ประเทศกำลังพัฒนามีสัดส่วนการใช้พลังงานจากชีวมวลคิดเป็น 20-35 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานรวมทั้งหมดในประเทศ แต่การใช้ส่วนใหญ่ยังจำกัดอยู่เฉพาะในภาคของอุตสาหกรรมขนาดเล็กและครัวเรือนเท่านั้น

ประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนา มีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องไปพร้อมกับความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น แต่ปัจจุบันแหล่งพลังงานในประเทศไทยมีไม่เพียงพอที่จะตอบสนองความต้องการได้ทั้งหมด จึงต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม เกิดการเสียดุลทางการค้าส่งผลกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ ในปี 2552 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมดเท่ากับ 24,872 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยมีสัดส่วนการใช้ในรูปพลังงานไฟฟ้าร้อยละ 2.2 อุตสาหกรรมการผลิตร้อยละ 66.3 ครัวเรือนร้อยละ 23.2 และเพื่อการขนส่งร้อยละ 8.3 และเมื่อจำแนกสัดส่วนการใช้ตามแหล่งพลังงาน พบว่าเป็นการใช้พลังงานชีวมวลของแข็งสูงถึงร้อยละ 52.2 ของการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมด [พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552 : ออนไลน์] ประเทศไทยได้นำชีวมวลใช้เพื่อผลิตพลังงานความร้อนมาแล้วในระดับครัวเรือน ทั้งนี้ศักยภาพการใช้พลังงานในระดับครัวเรือนยังมีอีกสูงมาก เพียงแต่ชาวบ้านยังขาดความเข้าใจในวิธีการทำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพและเก็บรักษาที่เหมาะสม ส่วนการใช้ชีวมวลผลิตไฟฟ้าจำกัดเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม ด้วยประเทศมีแนวโน้มที่จะขาดแคลนไฟฟ้าในอนาคต การสร้างโรงไฟฟ้าชีวมวลมีศักยภาพสูงที่จะผลิต และยังสามารถสร้างกระจายตามพื้นที่ต่างๆ ทั่วประเทศ ตามแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น ๆ

ชีวมวลเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่จะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้โดยตรงตามลักษณะเดิมเพื่อให้ได้พลังงานออกมาใช้ประโยชน์ ในขณะที่ชีวมวลส่วนใหญ่จำเป็นต้องแปลงสภาพก่อนนำไปใช้งาน เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล ชีวมวลจะมีลักษณะที่ด้อยกว่า ดังต่อไปนี้

- ชีวมวลมีค่าความร้อนต่ำ
- ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูง เป็นอุปสรรคในการเก็บรักษา และเป็นปัญหาในการเผาไหม้เพราะจะเกิดการสูญเสียความร้อน
- ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นต่ำ ต้องใช้อุปกรณ์ในการจัดการ เก็บรักษา การขนส่ง และการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่
- รูปแบบกายภาพไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว

ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงชีวมวลด้วยกระบวนการทอริฟิเคชัน ซึ่งการทอริฟิเคชันชีวมวลเป็นกระบวนการปรับปรุงชีวมวลให้มีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ดีก่อนนำไปใช้ในกระบวนการแปรรูปทางความร้อน เช่น เผาไหม้ แก๊สซิฟิเคชัน ไพโรไลซิส เป็นต้น สำหรับผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากกระบวนการทอริฟิเคชันจะมีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ดี ดังนั้น ความชื้นต่ำ องค์ประกอบธาตุออกซิเจนน้อย ค่าความร้อนสูง ไร้ควัน และลดพลังงานที่จะใช้ในการเผาไหม้ชีวมวล

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทอริฟิเคชัน โดยทอริฟิเคชันที่เลือกและไม่กระถินยักษ์ร่วมวัสดุเบต ซึ่งวัสดุเบตที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ทวาย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ทอริฟิเคชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเขย่า (shaking reactor) โดยคาดว่าจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังกระบวนการทอริฟิเคชันร่วมกับวัสดุเบตมีสมบัติเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของปัจจัยดำเนินการต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ชนิดชีวมวล ที่มีต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากกระบวนการทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์เขย่า
2. ศึกษาผลของวัสดุเบตชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งที่ได้ ได้แก่ ค่าความร้อน องค์ประกอบออกซิเจน เป็นต้น

1.3 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต ห้องสมุด และฐานข้อมูลวารสารทางวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการทอริฟิเคชัน
2. จัดหาชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ ชี้อ้อย และไม้กระถินยักษ์

3. จัดหาวัสดุเบตชนิดต่างๆ ได้แก่ ทราาย ซีโอไลต์ 3A และ ซีโอไลต์ 5A
4. ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการทอริแฟกชันซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์เมื่อไม่ใช้และใช้วัสดุเบตร่วมในกระบวนการ
 - 4.1. ผลของอุณหภูมิของการทอริแฟกชัน ได้แก่ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส
 - 4.2. ผลของชนิดวัสดุเบตร่วม ได้แก่ ทราาย ซีโอไลต์ 3A และ ซีโอไลต์ 5A
5. วิเคราะห์สมบัติของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ที่ทอริแฟกชัน ณ ภาวะดำเนินการทดลองต่างๆ
 - 5.1. วิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis): ASTM D3172 ได้แก่ ปริมาณความชื้น: ASTM D3173 ปริมาณสารระเหย: ASTM D3175 ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า: ASTM D3174
 - 5.2. วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate Analysis): CHN analyzer ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน
 - 5.3. วิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)
 - 5.4. วิเคราะห์องค์ประกอบและแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
6. วิเคราะห์ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการทอริแฟกชันซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์
7. วิเคราะห์ สรูปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของชีวมวลด้วยกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์เขย่า
2. ได้ผลิตภัณฑ์ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟกชันที่มีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ดีและเหมาะแก่การนำไปใช้

3. ได้ประโยชน์จากการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อเพิ่มมูลค่าและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้ ชีวมวลนับรวมถึงวัสดุทั้งทางการเกษตร เศษไม้ ปลายไม้จากอุตสาหกรรมไม้ มูลสัตว์ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร และของเสียจากชุมชนหรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร

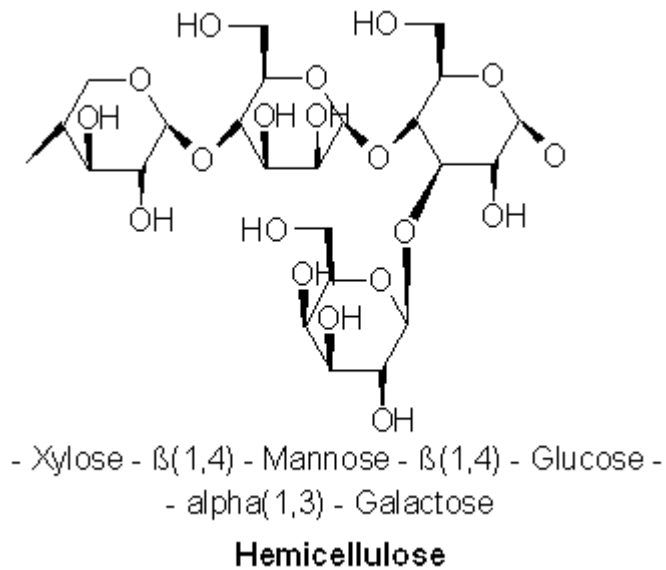
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล

องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวล คือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน โครงสร้างโมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วย น้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides)

เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่จะอยู่ในรูปอสัณฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลส มีมวลต่ำกว่ามาก และต่อกันแบบกิ่งก้านสาขามากกว่าแบบเส้นตรง เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 5 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีไซโลส ดีอะราไบโอส และคาร์บอนเท่ากับ 6 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีแมนโนส ดีกาแลคโตส และดีกลูโคส ซึ่งโมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอน 5 ตัวจะมีจำนวนมากกว่าโมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอน 6 ตัว สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยคือ $(C_5H_8O_4)_n$ เมื่อ n คือดีกรีของพอลิเมอร์ไรเซชัน เนื่องจากดีกรีพอลิเมอร์ไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50 ถึง 200 โดยมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถละลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสทั่วไปคือ ไคแลน (xylan) เคยมักใช้เป็น model compound แสดงโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสดังรูปที่ 2.1

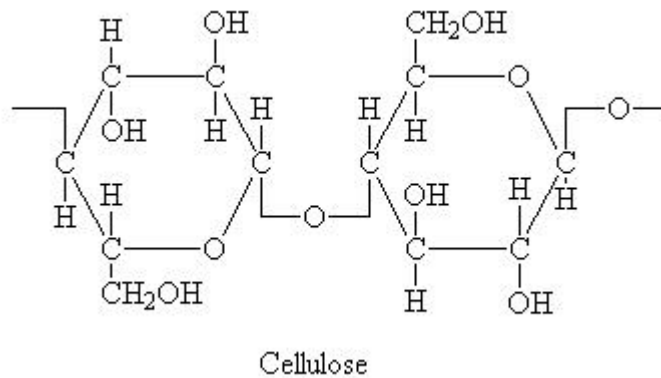
เซลลูโลส เป็นเส้นใยของพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช เซลลูโลสมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำและไม่ทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นพอลิเมอร์แซคคาไรด์ที่ดีกลูโคสถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิก มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ ดีกรีของพอลิเมอร์ไรเซชันมีความกว้างตั้งแต่หลายพันจนถึงหลายหมื่น จำนวนผลลัพธ์ของการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสคือ ดีกลูโคส (โมโนแซคคาไรด์) แต่บางส่วนให้ผลลัพธ์เป็นไดแซคคา

ไรด์ (เซลลูโลส) และโพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีลำดับ $n=3$ ถึง 10 เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึก แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

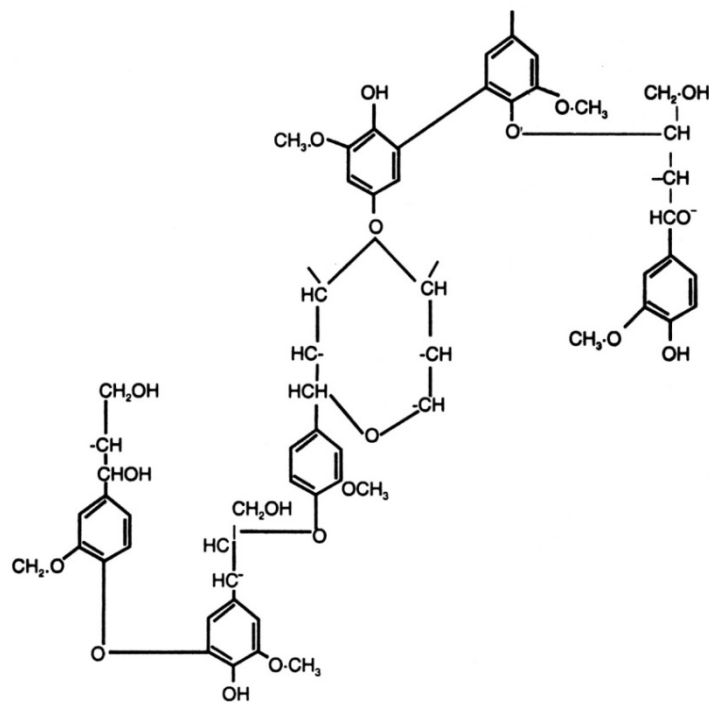
ที่มา : <http://upload.wikimedia.org>



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา : <http://doors-sliding.com>

ลิกนิน เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในพืช ประกอบด้วยโครงสร้างอะโรแมติกของหน่วยฟีนิลโพรเพนที่เชื่อมต่อกันด้วยคาร์บอนสายตรงเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ดังแสดงโครงสร้างลิกนิน ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่าลิกนินมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นผนังเซลล์ของพืชที่เป็นเสมือนกาวยึดและเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์พืช



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา : <http://www.eplantscience.com>

แสดงส่วนประกอบของพืชพลังงานตัวอย่าง โดยส่วนประกอบอื่น ๆ หมายถึง โปรตีน น้ำมัน และแร่ธาตุต่างๆ ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบองค์ประกอบทางเคมีของพืชพลังงาน (dry basis)

ชีวมวล	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	อื่นๆ (%)
ฟางข้าว	38	36	16	10
ต้นข้าวโพด	53	15	16	16
ซังข้าวโพด	32	44	13	11
ชานอ้อย	35	25	20	20
ไม้โตเร็ว	50	23	22	5
กระดาษ	76	13	11	0
ไม้ไผ่	41	26	27	7

ที่มา : นคร ทิพย์าวงศ์ (2553)

โดยปกติ ไม้เนื้ออ่อนมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 45 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 25 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 25 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ไม้เนื้อแข็งมีเซลลูโลส 40 ถึง 55 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 24 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 18 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ โดยอาจมีสารสกัดอื่นๆ ซึ่งเป็นสารประกอบธรรมชาติที่พบในไม้

เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมกลุ่มด้วยกัน จะเรียกว่า โฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของเสี้ยนไม้ เป็นที่น่าสนใจว่าสารประกอบโฮโลเซลลูโลสที่เป็นกลุ่มอะลิฟาติกมีอะตอมออกซิเจนร่วมจะพบเป็นส่วนใหญ่ในมวลเนื้อไม้ แต่ไม่พบสารประกอบอะโรมาติกเลย โฮโลเซลลูโลสเหล่านี้มีกลุ่มฟังก์ชันนัล (functional group) สำคัญคือ ไฮดรอกซิล(-OH) และเมทานอล (-CH₂OH) แต่ในลิกนินกลับพบกลุ่มของวงแหวนเบนซีนอยู่ โดยสารประกอบอะโรมาติกเหล่านี้พบว่าเกิดเป็นหน่วยเดี่ยวไม่ได้รวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ เหมือนกับในเชื้อเพลิงฟอสซิล กลุ่มฟังก์ชันนัลในลิกนิน คือ เมทอกซี (-OCH₃) โดยมีกลุ่มไฮดรอกซิลและเมทานอลอยู่บ้างเล็กน้อย

เศษวัสดุการเกษตร จะมีส่วนประกอบแตกต่างจากไม้ วัสดุเหล่านี้มีโฮโลเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ และมีลิกนินเล็กน้อยหรือไม่มีเลย และมีส่วนประกอบที่เป็นโปรตีนสูง โดยทั่วไปพืชตระกูลหญ้า เช่น ข้าว อ้อย จะมีเซลลูโลส 25 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ พืชอื่นๆ เช่น ฝ้าย มีเซลลูโลสสูงถึง 80 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีลิกนินเลย ต้นข้าวโพดมีลิกนินเพียง 3 เท่านั้น สำหรับปริมาณโปรตีนในไม้มีต่ำมากเพียง 0.2 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์ แต่พืชไม่ใช่ไม้ เช่น ฝ้าย มีโปรตีน 1.3 เปอร์เซ็นต์ ต้นทานตะวัน 2.1 เปอร์เซ็นต์ ต้นถั่วเหลือง 5.5 เปอร์เซ็นต์ หญ้าหวาน 24.7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกลุ่มอะโรมาติกในเศษวัสดุการเกษตรที่ไม่ใช่ไม้มีอยู่ในปริมาณน้อยกว่าในไม้ กลุ่มฟังก์ชันนัลจะเป็นพวกไฮดรอกซิลและเอมีน (-NH₂) เพราะพบในโปรตีนนั่นเอง

เชื้อเพลิงชีวมวลมีสูตรเคมีอย่างง่าย ดังนี้



2.1.2 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้คือ

เชื้อเพลิงที่ได้จากไม้ (forest biomass) ได้แก่ เศษไม้เปลือกไม้กิ่งไม้และขี้เลื่อยเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 40

เชื้อเพลิงที่ได้จากการเกษตร (agriculture biomass) ได้แก่ แกลบข้าว ชังข้าวโพดเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำประมาณร้อยละ 0-20

เชื้อเพลิงที่ได้จากอุตสาหกรรม (industrial wastes) ได้แก่ เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาลคือขานอ้อย กากสับปะรด ซึ่งเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีค่าความร้อนสูงมาก

เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (domestic Wastes) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะที่ทิ้งจากเทศบาล

2.1.3 ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวล

- เพิ่มมูลค่าแก่เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
- มีปริมาณกำมะถันต่ำ
- ราคาถูกกว่าเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์อื่นๆ โดยเปรียบเทียบต่อหน่วยความร้อนที่เท่ากัน
- เป็นแหล่งวัตถุดิบภายในประเทศ
- พลังงานจากชีวมวลจะไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก และแทบจะไม่ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศหรือทำให้อากาศเป็นพิษเลยในกรณีที่มีการปลูกทดแทน

2.1.4 ข้อด้อยของเชื้อเพลิงชีวมวล

- ปริมาณชีวมวลไม่แน่นอน ผลผลิตขึ้นกับสภาพอากาศ
- ชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่า
- ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูง เป็นอุปสรรคในการเก็บรักษา ส่งผลให้เป็นอุปสรรคในการเผาไหม้ เกิดการสูญเสียความร้อนและมลพิษสูง
- ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นต่ำ มีความจำเป็นต้องใช้ปริมาณมาก และต้องให้หุ้ อุปกรณ์ในการจัดการ การเก็บรักษา การขนส่ง และการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่
- รูปแบบกายภาพไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว ไม่สะดวกต่อการขนส่ง ตรวจสอบ เก็บรักษา หรือ บ้อนเข้า

2.1.5 ศักยภาพชีวมวลและการใช้ประโยชน์เชิงพลังงาน

การประเมินศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นปริมาณชีวมวล แสดงศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้ (ตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้นเปลือก/ใบ	170,383.17	19.44	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ชัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11
ปาล์ม น้ำมัน	8,162,379	ทะลายเปล่า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		ใบ	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
		กะลา	38,959.04	18.46	719.18	17.02
		ก้าน	2,203,740	9.83	21,824.24	516.62
มัน สำปะหลัง	30,088,025	ลำต้น	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628,990.82	15.40	9,686.46	229.30
		กาบ	464,250.95	16.23	7,534.79	178.36
		กะลา	128,936.58	17.93	2,311.83	54.73
ไม้ ยางพารา	3,090,280	กิ่ง/ก้าน	312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
รวม	145,853,073		59,539,905.20		504,339.40	11,938.67

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2552)

โดยทั่วไปแล้ว การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์เชิงพลังงานมี 2 ประเภท คือ

1. การใช้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อน เช่น การนำฟืนไปใช้ในเตาอั้งโล่ของชาวบ้านหรือการนำเศษไม้ที่เหลือจากการผลิตของโรงงานทำไม้ไปใช้ในหม้อไอน้ำเพื่อให้ได้อไอน้ำไปใช้ในการอบไม้
2. การไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น โรงน้ำตาลใช้กากอ้อยที่ได้จากการหีบอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าหรือโรงสีขนาดใหญ่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตเป็นต้น

ในประเภทแรกนั้น ประเทศไทยได้นำชีวมวลไปใช้เพื่อพลังงานความร้อนมาเป็นเวลานานแล้วในระดับครัวเรือน โดยไม้ฟืนและถ่านจัดเป็นชีวมวลสองชนิดที่มีการใช้ปริมาณสูงสุดในภาคครัวเรือนของไทย ส่วนในภาคอุตสาหกรรมนั้น กาก หรือขานอ้อยและแกลบจัดเป็นชีวมวลที่มีการใช้สูงที่สุดในการผลิตพลังงานความร้อน

ในประเภทที่สอง การนำชีวมวลไปผลิตกระแสไฟฟ้ายังจำกัดเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมประเภทที่ใช้กากอ้อยและแกลบเป็นเชื้อเพลิงหลัก ทั้งที่ประเทศไทยยังมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอีกมาก หากมีการนำชีวมวลที่เหลือใช้กลับมาใช้เป็นพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพได้ คาดว่าประเทศไทยจะมีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 36,200 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี (36,200 ล้านหน่วย) หรือเปรียบได้กับมีโรงไฟฟ้าขนาด 4,100 เมกกะวัตต์ เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งแห่ง [Limmeechokchai et al., 2007] ด้วยขนาดกำลังการผลิตเท่านี้ หมายถึง ประเทศสามารถรองรับการขยายตัวของการใช้ไฟฟ้าของประเทศได้อีกถึงสองปี (เขื่อนภูมิพล มีกำลังการผลิตที่ 740 เมกกะวัตต์ และโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีกำลังผลิตรวมประมาณ 2,600 เมกกะวัตต์) การนำชีวมวลที่เหลือจากการเกษตรมาผลิตไฟฟ้าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โรงไฟฟ้าชีวมวลมีศักยภาพสูงที่จะผลิตและใช้ได้ในพื้นที่ และยังสามารถสร้างกระจายตามพื้นที่ต่างๆ ได้ทั่วประเทศ ตามแหล่งผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นๆ

2.1.6 ไม้กระถินยักษ์

ไม้กระถินยักษ์ เป็นไม้ตระกูลถั่วที่มีความสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้โดยปมของไรโซเบียม มีถิ่นกำเนิดในอเมริกากลาง และได้แพร่ไปถึงประเทศฟิลิปปินส์ โดยอาจนำมาในของรูปอาหารสัตว์ ต่อมาประชาชนในท้องถิ่นได้เรียนรู้ว่าไม้สามารถใช้ทำฟืนได้ดี และแพร่ไปปลูกที่อินโดนีเซีย ปาปัวนิวกินี มาเลเซีย สำหรับในประเทศไทยนำเข้ามาปลูกประมาณ 20 กว่าปีที่ผ่านมา เพราะเห็นว่าเป็นไม้ที่เจริญเติบโตเร็ว



รูปที่ 2.4 ลำต้นไม้กระถินยักษ์

ที่มา : www.greencoun.com

ไม้กระถินยักษ์ เป็นไม้ขนาดกลาง มีลำต้นเรียบ เปลือกบางสีเทาปนน้ำตาลแดง ลักษณะเนื้อไม้จะมีกระพี้สีจางกว่าส่วนที่เป็นแก่น เนื้อไม้มีสีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำตาลอ่อน เส้นตรง เนื้อไม้ค่อนข้างแข็ง แสดงลักษณะลำต้นของไม้กระถินยักษ์ ดังรูปที่ 2.4 และเปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของไม้โตเร็ว ดังตารางที่ 2.3

ไม้กระถินยักษ์มีความถ่วงจำเพาะ 0.52 ความชื้น 15 เปอร์เซ็นต์ เหมาะใช้ทำเป็นฟืน โดยไม้กระถินยักษ์ให้ค่าความร้อน 16,438.4 บีทียูต่อกิโลกรัม และฟืนจากไม้กระถินยักษ์ 2.75 กิโลกรัม จะมีค่าเท่ากับการใช้ก๊าซเหลวเป็นเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม ซึ่งเท่ากับค่าความร้อน 45,265 บีทียูต่อกิโลกรัม กระถินยักษ์เป็นไม้เศรษฐกิจโตเร็วที่น่าสนใจ และเป็นไม้ที่มีอนาคตไกล เพราะสามารถนำทุกส่วนมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด ยังนำมาเป็นวัตถุดิบผลิตอาหารสัตว์ได้อีกด้วย น่าจะเป็นทางเลือกที่ช่วยให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นอีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของไม้โตเร็ว

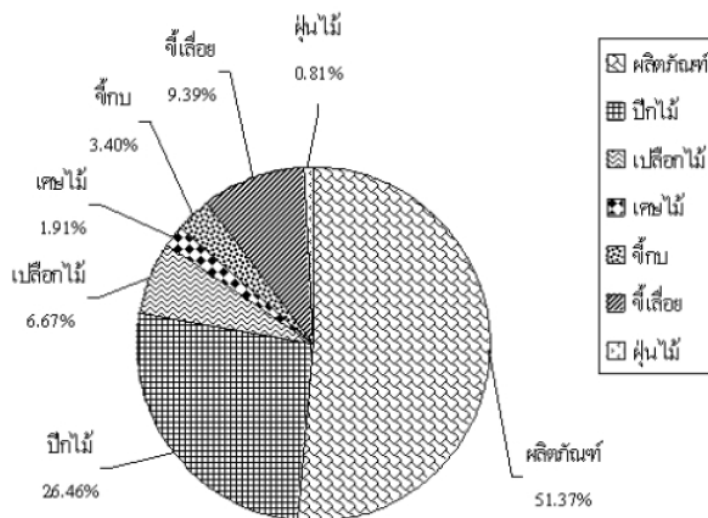
ชนิดไม้	ค่าความร้อน (MJ/Kg)	ผลผลิต (ตัน/ไร่)	อายุ (ปี)	อัตราการเจริญเติบโต ($m^2/ปี$)	ภูมิอากาศ	ลักษณะดิน	การปลูกและบำรุงรักษา
กระถินณรงค์	16.72	41.47	-	3.5-5	ทุกภาคของประเทศ ปริมาณฝน 1500-1800 มม./ปี	pH.5 ดินร่วนปนทราย	หยุดเมล็ดเพาะในแปลง
กระถินเทพา	20.10	13.99	2	5.8-6	อากาศร้อนชื้น ปริมาณฝนมากกว่า 2000 มม./ปี	pH 4.2	หยุดเมล็ดเพาะในแปลง ปลูกในฤดูฝน
กระถินยักษ์	15.91	15.84 17.92	3 4	-	ทุกภาค ปริมาณน้ำฝน 600 ถึง 1700 มม./ปี	pH 5.5	เพาะกล้า ดูแลพิเศษ ในช่วงเพาะกล้า
ยูคาลิปตัส	18.71	30.74	2-3	-	ทุกภาค	ดินร่วนปนทราย	การเพาะชำและเพาะเมล็ดหลังการใส่ปุ๋ย สูตร 15-15-15

ที่มา : วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติด้านพลังงาน

2.1.7 ชี้เสื่อย

ชี้เสื่อยเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากโรงเลื่อยไม้ หรืออุตสาหกรรมผลิตเฟอร์นิเจอร์ แสดงตัวอย่างเศษวัสดุเหลือใช้ที่มาจากอุตสาหกรรมผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพารา ดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าปึกไม้มีปริมาณมากที่สุด 26.46% แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทางจึงไม่เป็นปัญหาในการจัดการ ส่วนขี้กบและชี้เสื่อยมีปริมาณ 3.40 และ 9.39% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าปริมาณสูงแต่กลับไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ ส่วนมากมักเผาทิ้งกลางแจ้ง

ชี้เสื่อยเป็นชีวมวลที่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเนื่องจากชี้เสื่อยมีค่าความร้อนที่สูง และสามารถหาได้ง่ายตามท้องถิ่น สามารถแสดงค่าความร้อนของชีวมวลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูงสุดได้ดังตารางที่ 2.3 โดยอัตราส่วนการผลิตชี้เสื่อยคิดเป็น 3 ตันต่อไร่ และมีปริมาณชี้เสื่อยรวมทั่วประเทศไทยประมาณ 0.75 ล้านตันต่อปี [นคร ทิพย์วงศ์, 2008]



รูปที่ 2.5 แสดงสัดส่วนปริมาณของเศษวัสดุที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกระบวนการผลิต

ที่มา : <http://kb.psu.ac.th>

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล (กิโลกรัม)	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
ฟืน	15,989
ถ่าน	28,881
กากอ้อย	7,534
แกลบ	14,398
ขี้เสี้ยน	16,742

ที่มา : กระทรวงพลังงาน (2545)

2.2 กระบวนการทอริแฟกชัน

2.2.1 นิยาม

การทอริแฟกชันชีวมวล เป็นกระบวนการปรับปรุงชีวมวลให้มีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ดีขึ้น ถูกพัฒนามาจากกระบวนการคั่วเม็ดกาแฟ สำหรับกรรมวิธีการทอริแฟกชัน เป็นการสลายชีวมวลด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส โดยปราศจากการใช้แก๊สออกซิเจน มีอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่ออนาที โดยองค์ประกอบในชีวมวลที่เกิดการสลายตัวในช่วงนี้ส่วนใหญ่เป็นเฮมิเซลลูโลส

กระบวนการทอริแฟกชันสามารถแบ่งตามช่วงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 5 ขั้นตอน [Bergman et al., 2005] และแสดงช่วงของการทอริแฟกชัน ดังรูปที่ 2.6

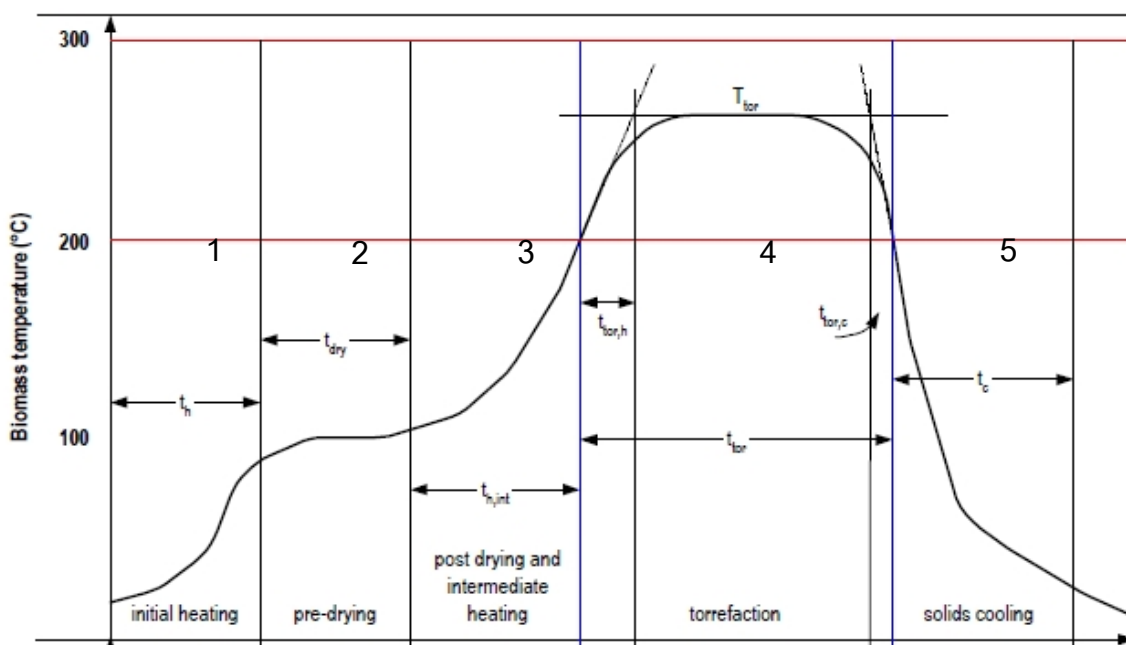
ขั้นตอนที่ 1 เริ่มได้รับความร้อน (initial heating) ช่วงนี้ความชื้นจะลดลงจากการระเหยของโมเลกุลน้ำอิสระในชีวมวล (free water)

ขั้นตอนที่ 2 ก่อนอบแห้ง (pre-drying) อัตราการลดลงของความชื้นในชีวมวลเริ่มคงที่

ขั้นตอนที่ 3 หลังอบแห้ง (post-drying) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 200 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้จะมีการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำซึ่งจับอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของชีวมวล (bound water) หลังจากช่วงนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่แห้ง

ขั้นตอนที่ 4 ทอริแฟกชัน (torrefaction) อยู่ในช่วงอุณหภูมิเกิน 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะประกอบด้วยช่วงได้รับความร้อน (heating period) ช่วงอุณหภูมิตั้งที่ (constant temperature period) และช่วงเย็นตัว (cool period) โดยการ devolatilisation จะเกิดขึ้นในช่วงได้รับความร้อนและช่วงอุณหภูมิตั้งที่ โดยหยุดการปลดปล่อยสารระเหยในระหว่างช่วงเย็นตัวหรืออาจหยุดหลังช่วงเย็นตัว

ขั้นตอนที่ 5 ผลิตภัณฑ์ของแข็งเย็นตัว (solids cooling) เย็นตัวจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสและลดลงจนถึงอุณหภูมิต้อง ไม่มีการปลดปล่อยสารระเหยแต่มีการระเหยสารระเหยซึ่งผลิตภัณฑ์ของแข็งอาจดูดซับไว้



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดปฏิกิริยาแต่ละช่วงอุณหภูมิในกระบวนการทอริแฟกชัน

ที่มา : Bergman (2005)

2.2.2 กลไกการแตกตัวขององค์ประกอบชีวมวลในกระบวนการทอริแฟกชัน

[Blasi et al., 1997]

ชีวมวลมีองค์ประกอบทางเคมีเป็น เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน มีกลไกการแตกตัวของแต่ละองค์ประกอบทางเคมีแบ่งเป็นโซนต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.7

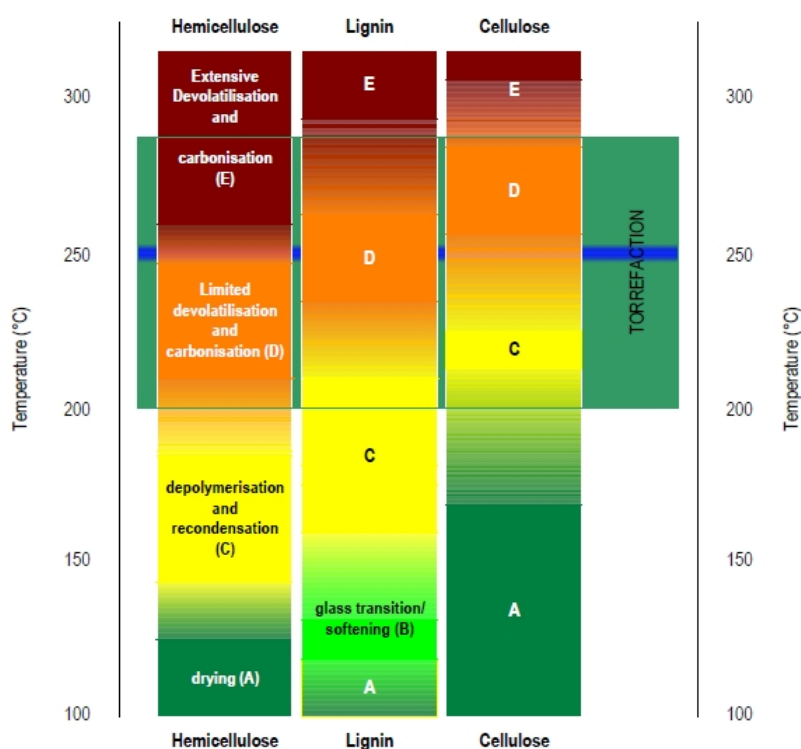
โซน A เป็นโซนการไล่ความชื้น

โซน B เป็นโซนสลาย softening lignin

โซน C เป็นโซนที่มีการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นสายสั้นๆ

โซน D เป็นที่เริ่มมีการปลดปล่อยสารระเหยและเกิดการคาร์บอนในเซชัน

โซน E เป็นโซนที่มีการปลดปล่อยสารระเหยที่รุนแรง



รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการแตกตัวของแต่ละองค์ประกอบทางเคมีแบ่งเป็นโซนต่างๆ

ที่มา : Koukious (1982)

โดยกระบวนการทอริแฟกชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส พบว่าส่วนใหญ่เฮมิเซลลูโลสในชีวมวลเกิดการสลายตัวในช่วงนี้ ซึ่งปกติเฮมิเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสและมีการปลดปล่อยสารระเหย (devolatilisation) อย่างเต็มที่เมื่ออุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 280 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการสลายตัวของชีวมวลแต่ละ

ชนิดอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล และองค์ประกอบทางเคมีแต่ละชนิดก็อาจมี interaction ระหว่างกัน [Bridgeman et al., 2008]

สำหรับกลไกการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสซึ่งแบ่งตามช่วงอุณหภูมิออกได้เป็น 2 กลไกคือ

1. เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการ depolymerisation ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์มีการแตกออกหรือขาดออก แล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็น oligosaccharides และ monosaccharides
2. อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส oligosaccharides และ monosaccharides เกิดการแตกตัวอีกครั้ง แล้วเกิดการฟอร์มตัวในรูปของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจนและน้ำ ซึ่งการฟอร์มตัวของสารระเหยเบา (light volatiles) เป็นผลจากการที่คาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลมีการสลายพันธะ จึงเกิดสารประกอบคาร์บอนิล (carbonyl compound)

การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลที่มีสัดส่วนของลิกนินสูงกว่าจะมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า ซึ่งลิกนินเป็นองค์ประกอบเคมีในชีวมวลที่มีช่วงการสลายค่อนข้างกว้าง อยู่ในช่วง 240 ถึง 600 องศาเซลเซียส [Hagedorn et al., 2003]

2.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ของกระบวนการทอริฟิเคชัน

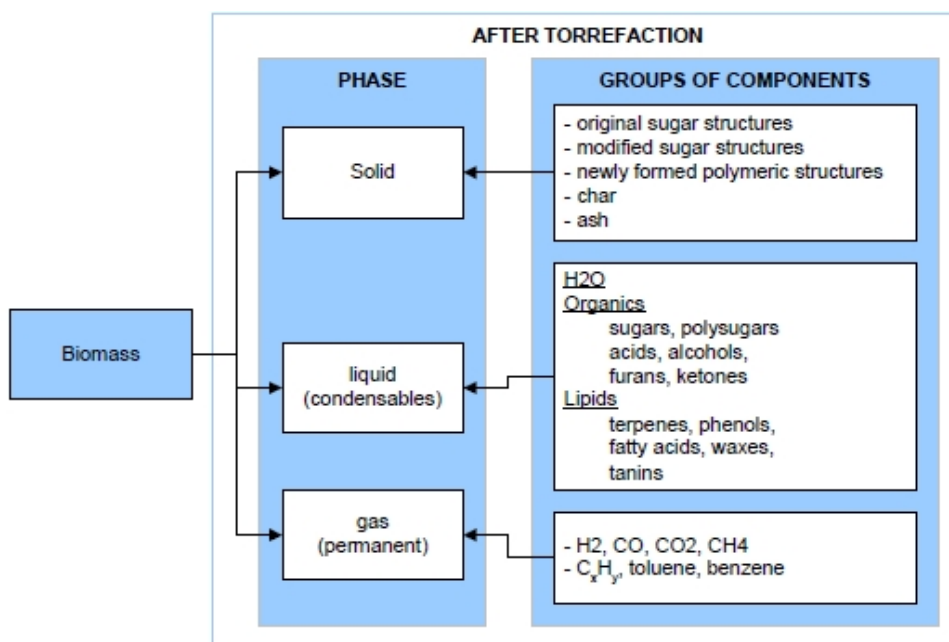
ผลิตภัณฑ์ของแข็ง (solid product) จากการทอริฟิเคชันชีวมวลจะเรียกว่า ทอริฟิไฟด์ไบโอแมส (Torrefied Biomass) ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จะมีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ดังนี้

- ค่าความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้น จาก 10-11 GJ/m³ เป็น 18-20 GJ/m³ สามารถลดต้นทุนการขนส่ง 40-50% [Wikipedia: ออนไลน์]
- ความชื้นและสารระเหยลดลง จึงเป็นเชื้อเพลิงไร้ควัน ใช้งานได้สะดวกมากขึ้น
- เป็นสารเนื้อเดียวมากขึ้น ลดปัญหาการปะทุของเชื้อเพลิงขณะเผาไหม้
- สัดส่วน O/C ในผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลง
- เผาไหม้แล้วให้ค่าความร้อนสูง

ผลิตภัณฑ์สารระเหย (volatile products) ประกอบด้วย สารระเหยที่สามารถควบแน่นได้ (condensable volatile) ซึ่งก็จะเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว และสารระเหยที่ไม่ควบแน่น (non-condensable volatile) จะเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์สารระเหยที่สามารถควบแน่นได้ (condensable volatile) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอริแฟกชัน ส่วนใหญ่เป็นน้ำและกรดแอซิดิก นอกนั้นอาจพบ เมทานอล กรดฟอร์มิก กรดแลคติก เฟอร์ฟูรอล ไฮดรอกซีลอะซิโตน จากการที่เฮมิเซลลูโลสในชีวมวลเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีหมู่ acetoxy- และ methoxy- เมื่อสลายตัวด้วยความร้อนและจะฟอร์มตัวในรูปของกรดแอซิดิกและเมทานอล

ผลิตภัณฑ์สารระเหยที่ไม่ควบแน่น (non-condensable volatile) ส่วนมากเป็นสารระเหยพวก คาร์บอนไดออกไซด์ รองลงมาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน โดยการฟอร์มตัวของ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลจากการ decarboxylation กำจัดหมู่ -COOH ออกจากสารประกอบโพลีแซคคาไรด์ทำให้ได้แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ [J. Mark et al., 2006] และแสดงแผนภาพสรุปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดในกระบวนการทอริแฟกชัน ดังรูปที่ 2.8 [Bergman et al., 2005]



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพสรุปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการทอริแฟกชัน
ที่มา : Bergman (2005)

2.3 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

ในการแสดงคุณสมบัติเชื้อเพลิงแข็งมักใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแยกธาตุ (ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ดังต่อไปนี้

ความชื้น (moisture) โดยส่วนใหญ่ชีวมวลจะมีความชื้นค่อนข้างสูง ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

สารระเหย (volatile matter) คือส่วนที่ลุกไหม้ง่าย และสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย

คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) เป็นของแข็งที่เหลือจากการไล่สารระเหยและความชื้น ที่ไม่รวมขี้เถ้า

$$\text{ปริมาณ Fixed Carbon} = 100 - (\text{ความชื้น} + \text{ขี้เถ้า} + \text{สารระเหย})$$

เถ้า (ash) เป็นแร่ธาตุต่างๆ ที่เหลือจากการเผาไหม้ ชีวมวลโดยทั่วไปจะมีขี้เถ้าประมาณ 1 -3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณ 10 -20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีปัญหาในการกำจัดพอสมควร โดยอัตราส่วนระหว่างสารระเหยต่อคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ประมาณ 2.5 ถึง 3.5 เท่าสำหรับไม้และ 2.5 ถึง 5.2 เท่าสำหรับเศษวัสดุการเกษตร ส่วนการวิเคราะห์แบบประมาณจะเป็นการระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆ ในเชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะเป็น คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน

2.4 ค่าความร้อน (Heating value หรือ Calorific value)

ค่าความร้อน คือพลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ที่มีจุดเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง แล้วผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับอุณหภูมินี้ ค่าความร้อนที่ใช้มีทั้งค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้

ค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลที่รวม เมื่อไอน้ำของก๊าซที่เกิดขึ้นกลั่นตัวเป็นน้ำ หมายความว่าค่าความร้อนนี้รวมค่าความร้อนแฝง (Latent heat) ของน้ำด้วย

ค่าความร้อนสูงค่าความร้อนสูง (higher heating value) เป็นค่าความร้อนที่ไม่รวมค่าความร้อนของน้ำ โดยการลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมดก่อนนำมาหาค่าความร้อน และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$\text{HV} = \text{LHV} + 5.72(9\text{H} + \text{M}) \text{ kcal/kg หรือ}$$

$$\text{HV} = \text{LHV} + 23.95(9\text{H} + \text{M}) \text{ kJ/kg}$$

เมื่อ H เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล และ M เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล

ในการคำนวณค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าประมาณกลางๆ คือ 10-20 MJ/kg โดยค่าความร้อนของชีวมวลกลุ่มไม้จะมีค่าสูงกว่ากลุ่มไม้ไผ่ไม้เล็กน้อย ค่าความร้อนของชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (M) และเศษเถ้า หรือได้จากการใช้สูตรอย่างง่ายคำนวณ เช่น สูตรของดูลอง (dulong formula) โดยสัดส่วนโดยมวลของแต่ละธาตุที่เกี่ยวข้อง [Tillman et al., 1991]

$$\text{HHV (MJ/Kg)} = 33.585 \text{ C} + 141.924 \text{ H} + 12.908 \text{ S} - 15.327 \text{ O} - 3.538 \text{ O}^2$$

สูตรของเดเมียบาส (Demirbas A., 1997)

$$\text{HHV (MJ/Kg)} = 33.5 \text{ C} + 142.3 \text{ H} - 15.4 \text{ O} - 24.5 \text{ N}$$

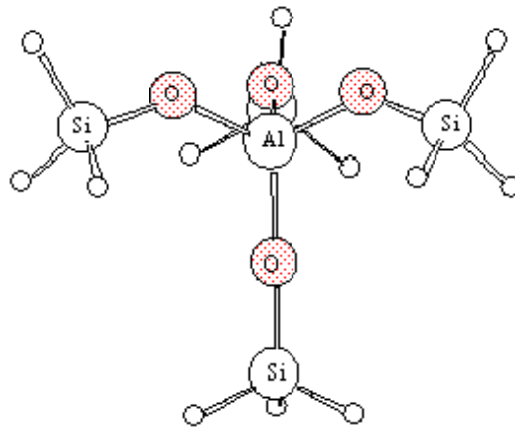
$$\text{HHV (MJ/Kg)} = 31.2 \text{ FC} + 15.34 \text{ VM}$$

2.5 ซีโอไลต์ (zeolite)

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอน(หรืออะลูมิเนียม)อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม(ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) และออกซิเจนแล้วในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้ แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ ดังรูปที่ 2.9

ซีโอไลต์ เป็นสารในรูปแร่อะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicates) ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติดูดน้ำได้ดี ดังนั้นเมื่อนำไปใช้โดยใส่ลงไปในดินจึงช่วยทำให้ดินมีความสามารถอุ้มน้ำได้สูงขึ้น และทำให้พืชที่ปลูกสามารถใช้น้ำในดินได้ดีขึ้น นอกจากนั้นซีโอไลต์ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่มีคุณค่าอีกหลายประการ เช่น มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงมากรวมทั้งความสามารถในการดูด

ชั้นโมเลกุลสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็็นสารที่ไม่มีพิษภัยหรือสารพิษต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดภาวะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม



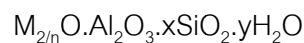
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์

ที่มา : <http://www.vcharkarn.com>

2.5.1 โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่ประกอบด้วย ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของโลหะอัลคาไลด์หรือโลหะอัลคาไลด์เอิร์ทซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเชียม และแบเรียม โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็น โครงสร้าง 3 มิติ ของอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ซึ่งประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกต โดยมีการเชื่อมต่อของอะตอมออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer)

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ เป็นดังนี้



n = คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) โดยมาก เท่ากับ 1 และ 2 ของโลหะอัลคาไลด์หรือโลหะอัลคาไลด์เอิร์ทตามลำดับ

x = คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ

y = คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

2.5.2 ชนิดของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี ดังนี้

1. ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (mineral zeolites or Naturally occurring zeolites) ส่วนมากพบจากการทำเหมืองแร่ เป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์เบส (mono and divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำผลึกบางส่วนหรือทั้งหมด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น faujasite erionite offretite chabazite clinoptilolite เป็นต้น ซีโอไลต์ธรรมชาติเดิมนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง ในทางอุตสาหกรรมใช้เป็น filter ในอุตสาหกรรมกระดาษ หลังจากได้ค้นพบคุณสมบัติการเป็น molecular sieves และ ion exchange จึงได้นำมาใช้เป็น molecular sieves adsorbent ในอุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติและแยกแอมโมเนียในขบวนการกำจัดน้ำทิ้ง

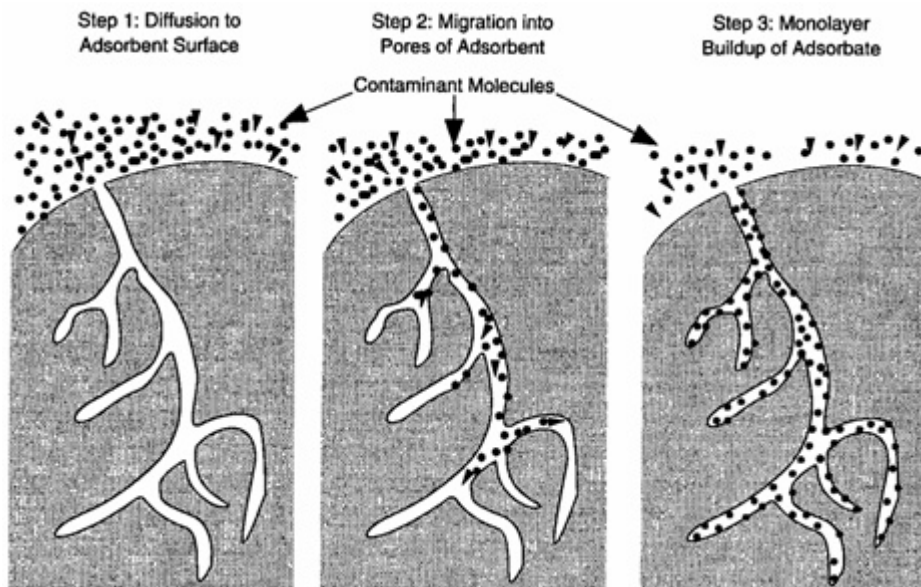
2. ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (synthetic zeolite) เกิดจากการทำปฏิกิริยาเบสออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจล (gelatin) จนถึงรูปที่เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (sandlike) ได้แก่ Zeolite A, Zeolite Y, Zeolite F, Zeolite M เป็นต้น

2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (adsorption) การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสารที่เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งในตัวกลางใดๆ ไปเกาะบนผิวของสารอีกชนิดหนึ่งถูกนำไปอยู่ในตัวกลางนั้นเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbant)

การดูดซับเชิงกายภาพ (physical adsorption) เมื่อโมเลกุลของแก๊สผ่านเข้าไปก็จะถูกดูดไว้ภายในรูพรุนเหล่านี้ด้วยแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ คือแรงแวนเดอวาลส์ (van der waal adsorption) เนื่องจากพบว่า ตัวดูดซับสามารถดูดซับโมเลกุลแก๊สไว้ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าความดันที่อิ่มตัว (saturation pressure) ของแก๊สนั้น แสดงว่าแรงแวนเดอวาลส์ที่เกิดขึ้น ที่เกิดขึ้นต้องมีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแก๊ส กับโมเลกุลของของเหลวเพื่อให้เกิดการควบแน่น (condensation) ปรากฏการณ์การดูดซับแก๊สขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างที่ยุ่งยากของของแข็ง คุณสมบัติทางเคมีของแก๊สและของแข็ง จำนวนชั้นของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดบนพื้นผิวและขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ ซึ่งการดูดซับเชิงกายภาพเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ ให้ความร้อนออกมาเล็กน้อย (แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น) ขึ้นโดยตรงกับความดันย่อยของแก๊สชนิดนั้น และสามารถดูดซับแก๊สไว้ได้ในปริมาณสูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

การดูดซับเชิงเคมี (chemical adsorption) เป็นการดูดซับทางเคมี ที่โมเลกุลของตัวดูดซับทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของตัวถูกดูดซับ โดยสร้างพันธะเคมี ทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้นและเกี่ยวข้องกับการ transfer of electron ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ การดูดซับเชิงเคมีจะให้ความร้อนสูงมากเพราะการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความดันมากนัก พลังงานที่ทำให้เกิดการดูดซับทางเคมีมีค่าสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ คือ มีค่าประมาณ -200 KJ/mol ปริมาณการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ หลายประการ คือ พื้นที่จำเพาะของของแข็ง ความเข้มข้นที่สมดุลของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายสามารถเกิดในอุณหภูมิสูงกว่าที่เกิดดูดซับเชิงกายภาพและแรงที่เกี่ยวข้องก็มากกว่า โดยสามารถแก๊สไว้ได้น้อยกว่าในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากดูดซับจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวนั้นเกิดได้บนพื้นที่ผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นที่ผิวทั้งหมด และแสดงกลไกของการดูดซับ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงกลไกของการดูดซับ

ที่มา : <http://www.pcd.go.th>

2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. พื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับการดูดซับ
2. การแลกเปลี่ยนใช้สารดูดซับต้องดูคุณสมบัติในการชอบสารประกอบโพลาร์หรือนอนโพลาร์
3. การดูดซับจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแก๊สและสารละลายที่ต้องการจับ

4. ความจุของสารดูดซับควรมีค่าแน่นอน และสูงกว่าปริมาณแก๊สและสารละลายที่ต้องการจับแต่หลังจากที่เติมความจุของมันแล้ว ก๊าซและสารละลายจะดูดซับเพียงบางส่วนจนอิ่มตัวแล้วจะไม่ดูดซับแก๊สและสารละลาย
5. มีความสามารถในการแยกชั้นแก๊ส
6. อุณหภูมิในการดูดซับ ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะก๊าซที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน การให้ความเย็นจะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดี

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pach และคณะ (2002) ศึกษาการทอริแฟกชันของ ไม้เบิร์ช (birch) ไม้ต้นสน (pine) และ กากน้ำตาล (sugar cane bagasse) ในเครื่องปฏิกรณ์ท่อไหล (tubular reactor) ขนาดความสูง 0.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.04 เมตร ด้วยอุณหภูมิทอริแฟกชันที่ 230, 250, 280 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าไม้เบิร์ช และไม้ต้นสน ให้น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ (mass yield) ที่สูงกว่า ส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊ส ผลิตภัณฑ์จะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกากน้ำตาล โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา จะให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ลดลงในขณะที่ร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์และทาร์เพิ่มขึ้น มีการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบคาร์บอนในขณะที่ออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง และยังให้ค่าทางความร้อนสูงขึ้น ส่วนอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยไม่ค่อยมีผลต่อการทดลอง

Bergman และคณะ (2004) ศึกษาการใช้ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชันในกระบวนการแกซีฟิเคชันเปรียบเทียบกับชีวมวลที่ไม่ผ่านการทอริแฟกชัน พบว่าการใช้ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชันเป็นวัตถุดิบในกระบวนการแกซีฟิเคชัน พบว่าช่วยเพิ่มสมบัติฟลูอิดิเซชัน (fluidization properties) ที่ดีขึ้น โดยสามารถลดพลังงานที่ใช้บดย่อยชีวมวลประมาณ 50 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ลดขนาดอนุภาคได้อนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 30 ถึง 400 ไมโครเมตร โดยอนุภาคมีรูปร่างเข้าใกล้ทรงกลมมากขึ้น พลังงานที่ได้คิดเป็น 83 ถึง 97 เปอร์เซ็นต์ และลดเวลาในการทำปฏิกิริยา ใช้เวลาน้อยกว่า 10 นาที

Bergman และคณะ (2005) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชัน ด้วยเทคนิค TOP (Torrefaction and Peletisation) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นด้วยการทำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากทอริไฟต์ไปโอเมสเทียบกับการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากชีวมวลที่ไม่ผ่านการทอริแฟกชัน พบว่าการใช้เทคนิค TOP กับทอริไฟต์ไปโอเมสจะเพิ่มมูลค่าต่อหน่วยน้ำหนักเชื้อเพลิง ลดค่าใช้จ่ายลง 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพทางความร้อน 96 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาแน่นพลังงานเพิ่มเป็น 15 ถึง 18.35 จิกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร เทียบกับการอัดเม็ดชีวมวลโดยตรงที่มีความหนาแน่นพลังงานเพียง 8 ถึง 10 จิกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร

Prins และคณะ (2006) ศึกษาและวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ต้นหลิว (Willow), ไม้รัช (Larch) และฟางข้าว (Straw) ในปฏิกรณ์แบบ Horizontal Quartz Fixed Bed Reactor พบว่าชีวมวลแต่ละชนิดจะมีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยเฉพาะปริมาณเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลที่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่

ใกล้เคียงกับอุณหภูมิซึ่งใช้ในภาวะดำเนินการของกระบวนการทอริแฟกชัน ดังนั้นปริมาณเฮมิเซลลูโลสจึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลพฤติกรรมการสลายตัวและชนิดขององค์ประกอบในสารระเหยที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอริแฟกชัน

Arias และคณะ (2008) ศึกษาภาวะดำเนินการของกระบวนการทอริแฟกชันต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของไม้ยูคาลิปตัสหลังผ่านกระบวนการ และความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาของชีวมวล ในปฏิกรณ์แบบ Horizontal Quartz Fixed Bed Reactor ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิการทอริแฟกชันที่ 240, 260 และ 280 องศาเซลเซียส เวลา 0-3 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าเมื่อผ่านกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวลมีขนาดลดลง ซึ่งส่งผลดีต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เหมาะจะใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีระบบการไหลเนื่องจากอนุภาคชีวมวลมีขนาดเล็กและมีรูปร่างใกล้เคียงทรงกลมมากขึ้น ลดการขีดขวางหรืออุดตันภายในท่อได้ และภาวะที่เหมาะสมต่อการทอริแฟกชันชีวมวลเพื่อใช้ในกระบวนการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนคือที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที

Bridgeman และคณะ (2008) ศึกษาคุณภาพเชื้อเพลิงแข็งและสมบัติการเผาไหม้ของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟกชันของชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ หญ้า, ฟางข้าว และต้นหลิว ศึกษาการพฤติกรรมการสลายทางความร้อนที่เกิดขึ้นของชีวมวลในกระบวนการทอริแฟกชันด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA) ภาวะที่ศึกษามีอุณหภูมิทอริแฟกชัน ที่ 503, 523, 543, 563 เคลวิน และอัตราการให้ความร้อน 10 เคลวินต่อนาที พบว่าชีวมวลหลังกระบวนการทอริแฟกชัน เมื่อมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในกระบวนการเผาไหม้ชีวมวล ทำให้ชีวมวลมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ดีขึ้น ความชื้นลดลง ค่าสัดส่วนธาตุออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลง ให้ค่าทางความร้อนที่สูงขึ้น และสามารถเผาในอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำกว่าการใช้ชีวมวลที่ไม่ผ่านกระบวนการนี้

Yub Harun และคณะ (2009) ศึกษาการทอริแฟกชันเนื้อในของเมล็ดยางพาราด้วยเครื่อง TGA ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 240, 280 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.050, 0.025 มิลลิเมตร และเวลาทำปฏิกิริยา 1.5, 3 ชั่วโมง พบว่า อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา มีผลทั้งทางกายภาพและเชิงเคมีต่อผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังผ่านกระบวนการ และภาวะที่เหมาะสมต่อการทอริแฟกชันเนื้อในของเมล็ดยางพาราคือที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาค 0.025 มิลลิเมตร และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง

อนุพันธ์ พิมพ์ช่วย และคณะ (2552) ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ระหว่างการใช้แก๊สที่ผ่านการทอริรีแฟกชันกับแก๊สธรรมชาติด้วยเครื่องเซพาทูฟลูอิดเบดรีแอกเตออร์ ซึ่งการศึกษาคุณสมบัติของแก๊สที่ผ่านกระบวนการทอริรีฟิเคชันพบว่าปริมาณความชื้น, ปริมาณสารระเหย และการดูดซับความชื้นของแก๊สลดลงร้อยละ 69.89, 3.44 และ 89.15 ตามลำดับ ส่วน ปริมาณซีเถ้า, ปริมาณคาร์บอนเสถียรและค่าความร้อนของแก๊สเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.89, 49.13 และ 10.96 ตามลำดับ และจากการทดสอบสมรรถนะในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าเมื่อป้อนแก๊สที่ผ่านกระบวนการทอริรีแฟกชันจะให้ผลอุณหภูมิในเซพาทูฟลูอิดเบดรีแอกเตออร์และส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ (คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและก๊าซไฮโดรเจน) มีค่าสูงกว่าการป้อนด้วยแก๊สธรรมชาติ

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทอริฟฟิเคชันชีวมวลโดยการนำวัสดุเบดร่วมในกระบวนการ เพื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งได้ดีขึ้น

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

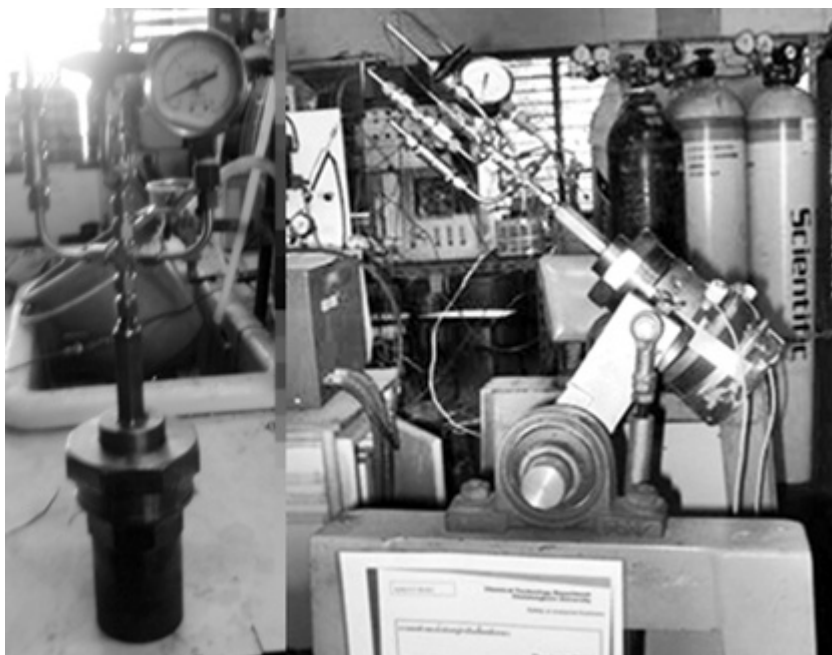
1. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ
2. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด
3. ตะแกรงร่อนขนาด 800, 600, 500, 425, 250 ไมโครเมตร
4. ครุชีเบ็ด (crucible)
5. บีกเกอร์
6. แท่งแก้วคน
7. เตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace)
8. เครื่องให้ความร้อน (tube furnace)
9. เตาอบ (oven)
10. ช้อนตักสาร
11. ตู้ควบคุมความชื้น
12. เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียด 4 ตำแหน่ง
13. นาฬิกาจับเวลา

14. ชุดกรองสูญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศเพื่อทำการกรองแยกแบบสูญญากาศ สำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งบ้าง ส่วนออกจากสารละลายอะซิโตนที่ใช้ชะล้างทำความสะอาดภายในเครื่อง ปฏิกรณ์ที่ยังคงตกค้างอยู่ และกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว
15. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K
16. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)
17. ถังเก็บตัวอย่างแก๊ส ขนาด 2 ลิตร

3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเขย่า (shaking reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบเขย่าที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ รูปทรงกระบอก ปริมาตร 2 ลิตร ทำจากสแตนเลส โดยด้านบนมีชุดฝาปิด มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊สและวาล์วนิรภัย มีเทอร์โมคัปเปิล ด้านบนสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง ซึ่งแสดง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เขย่า

2. ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Temperature controller) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดความร้อนและตัดการจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส
3. ขดลวดความร้อนแบบ injection แรงดัน 220 โวลต์ กำลัง 600 วัตต์
4. ทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นแบบเค (K-type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร
5. ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง สามารถปรับความเร็วรอบของการแกว่งได้จากชุดควบคุมความเร็ว แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และเครื่องเขย่า

3.1.3 เครื่อง CHN Analyzer

เครื่อง CHN Analyzer รุ่น CHN-2000 ยี่ห้อ Leco เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาร้อยละคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนของชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นและชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชัน แสดงดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่อง CHN Analyzer

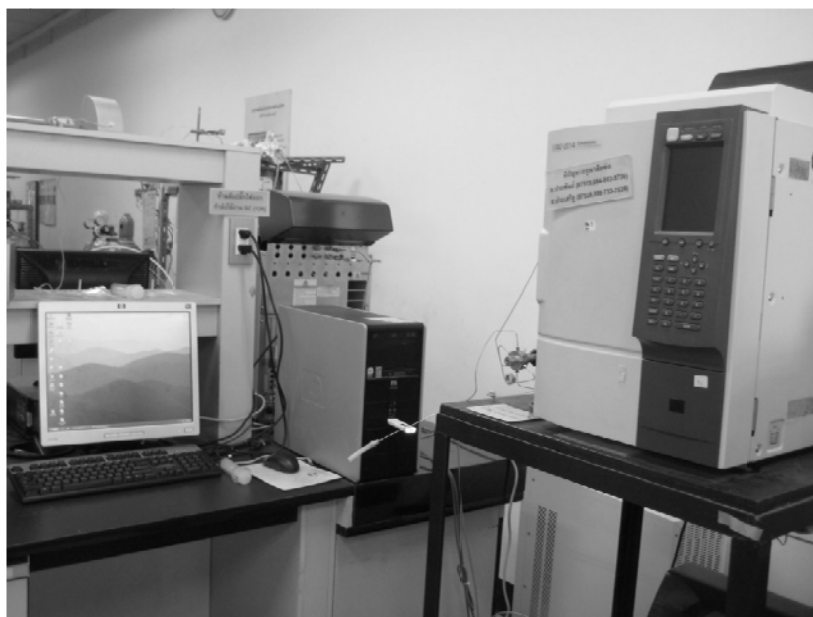
3.1.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากเครื่องปฏิกรณ์ โดยสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สแสดง ดังตารางที่ 3.1

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า stationary phase และมีแก๊สพา เป็นเฟสเคลื่อนที่ เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโทแกรม โดยเครื่องบันทึก

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สพา(carrier gas)	แก๊สฮีเลียม(He), แก๊สอาร์กอน(Ar)
ชนิดคอลัมน์	ประกอบด้วย 3 คอลัมน์
อุณหภูมิการฉีด	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์(injector temperature)	110, 60 และ 90 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด(Detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.1.5 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)

เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ รุ่น 6200 CALORIMETER ยี่ห้อ Parr เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง แสดงดังในรูปที่ 3.5

3.2 ซิวมวล วัสดุเบด และสารเคมี

1. ซี้เสื่อย และ ไม้กระถินยักษ์
2. ซีโอไลต์ 3A และ 5A จากบริษัท GrandBiz Trading จำกัด

3. อะซิโตนและซีลีกาเจล จากบริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด
4. แก๊สไนโตรเจน 99.95 % จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด



รูปที่ 3.5 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมชีวมวลและวัสดุเบด

1. นำซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์คัตแยกขนาดให้อยู่ในช่วง 425-250 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำวัสดุเบด ทราาย ซีโอไลต์ 3A และ 5A เผาไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 400 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บวัสดุเบดไว้ในตู้ควบคุมความชื้น
3. นำชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น วิเคราะห์แบบประมาณ วิเคราะห์แยกธาตุด้วยเครื่อง CHN Analyzer และหาค่าความร้อนด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

วิเคราะห์แบบประมาณตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D3172-3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และไนโตรเจน (N) ด้วยเครื่อง CHN Analyzer

3.3.3 การทอรรีแฟกชันชีวมวล

1. ชั่งน้ำหนักชีวมวล ปริมาณ 10 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
2. นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในโดยอัดแก๊สไนโตรเจนแล้วค่อยๆ ปลดอxygen ทิ้ง ทำซ้ำ 5 ครั้ง หรือจนมั่นใจว่าไม่มีอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นทำการปิดวาล์วจนสนิท
3. ต่ออุปกรณ์ขดลวดความร้อนเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะมีการหุ้มฉนวนทับเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง และต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับชุดเครื่องเขย่า
4. ปรับกระแสไฟฟ้าจากชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และเปิดสวิตช์เครื่องเขย่า โดยกำหนดอัตราการแกว่งคองที่ 7.5 รอบต่อนาที
5. เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา จับเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นทำการ cool down เครื่องปฏิกรณ์ โดยการปิดสวิตช์ชุดควบคุมจ่ายกระแส แล้วรอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิห้อง

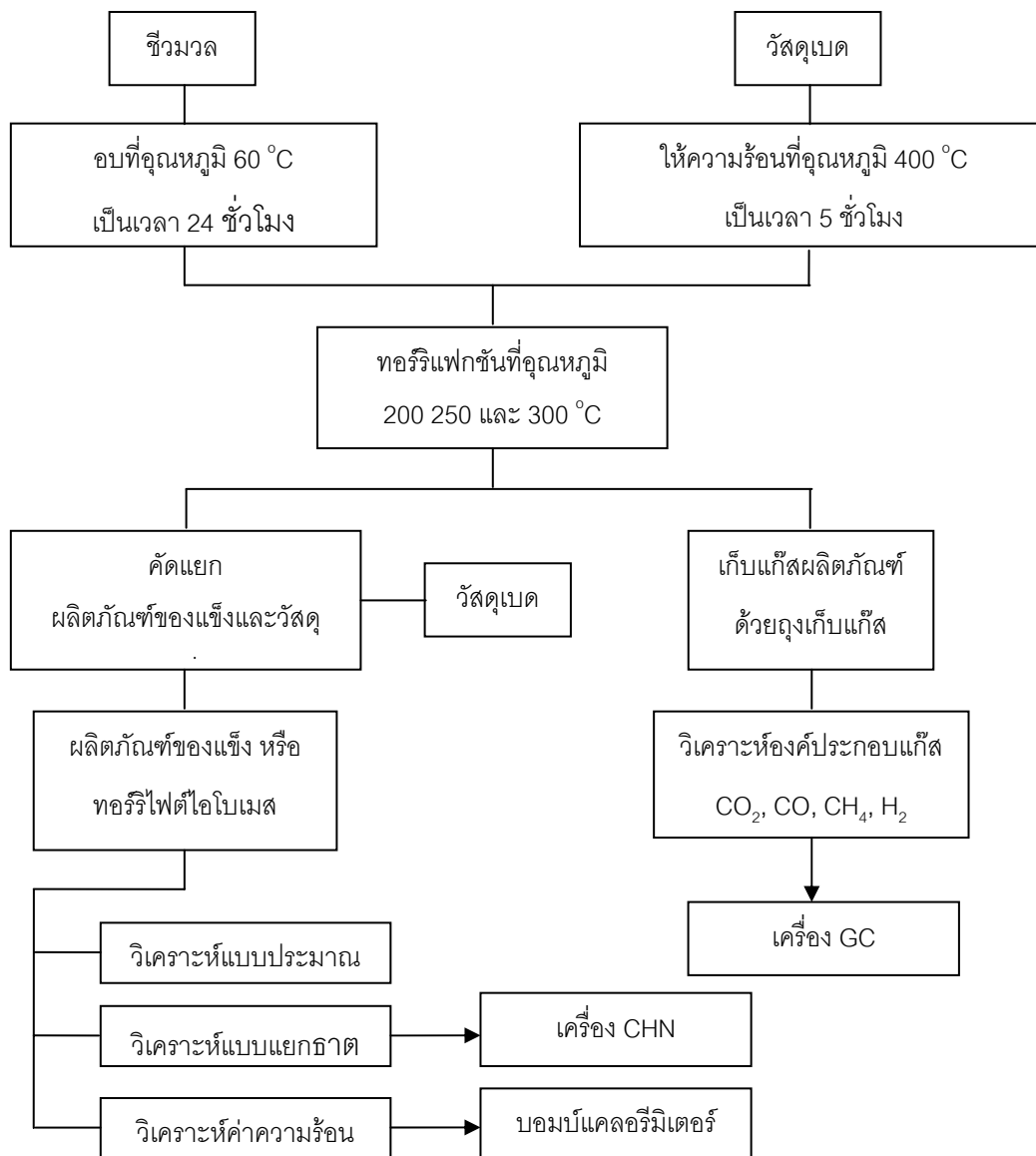
6. ทำการเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ วิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
7. ทำการเก็บผลิตภัณฑ์ของแข็ง เพื่อวิเคราะห์แบบประมาณ วิเคราะห์แยกธาตุด้วยเครื่อง CHN Analyzer และหาค่าความร้อนด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์
8. ทำการเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ วิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน

3.3.4 การทอรรีแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบด

1. ชั่งน้ำหนักชีวมวลและวัสดุเบด ปริมาณ 10 กรัม (สัดส่วนชีวมวลต่อวัสดุเบด เป็น 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก) จากนั้นผสมชีวมวลและวัสดุเบดเข้าด้วยกันแล้วใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ และปิดฝาให้เรียบร้อย
2. นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในโดยอัดแก๊สไนโตรเจนแล้วค่อยๆปล่อยทิ้ง ทำซ้ำ 5 ครั้ง หรือจนมั่นใจว่าไม่มีอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นทำการปิดวาล์วจนสนิท
3. ต่ออุปกรณ์ขดลวดความร้อนเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะมีการหุ้มฉนวนทับเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง และต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับชุดเครื่องเขย่า
4. ปรับกระแสไฟฟ้าจากชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และเปิดสวิตช์เครื่องเขย่า โดยมีอัตราการแกว่งคองที่ 7.5 รอบต่อนาที
5. เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา จับเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นทำการ cool down เครื่องปฏิกรณ์ โดยการปิดสวิตช์ชุดควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า แล้วรอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิห้อง
6. ทำการเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีภายในเครื่องปฏิกรณ์ นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

7. ทำการเก็บผลิตภัณฑ์ของแข็ง และคัดแยกวัสดุเบ็ดออกจากชีวมวลด้วยตะแกรงร่อนขนาด 500 ไมโครเมตร ซึ่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ยังคงค้างอยู่ภายในกระบอกลงของเครื่องปฏิกรณ์ให้ทำการชะล้างด้วยสารละลายอะซิโตน แล้วกรองผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ตกค้างออกด้วยชุดอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองแบบใยแก้ว นำผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เหลือตกค้างไปอบแห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เหลือตกค้าง
8. นำผลิตภัณฑ์ของแข็งมาวิเคราะห์แบบประมาณ วิเคราะห์แยกธาตุด้วยเครื่อง CHN Analyzer และหาค่าความร้อนด้วยบอมบ์แคลอรีมิเตอร์
9. ทำการเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีภายในเครื่องปฏิกรณ์ นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

สามารถแสดงแผนผังการทดลองในงานวิจัยนี้ ได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังการทดลองในงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการทอริแฟกชันชีวมวลด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน แต่ยังไม่มียานวิจัยใดกล่าวถึงการทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของอุณหภูมิและผลของวัสดุเบตที่มีต่อการทอริแฟกชันชีวมวลด้วยเครื่องปฏิกรณ์เขย่า โดยในงานวิจัยเลือกใช้ชีวมวล 2 ชนิด คือ ชี้อ้อยและไม้กระถินยักษ์ และใช้วัสดุเบต 3 ชนิด คือ ทรายซีโอไลท์ 3A และซีโอไลท์ 5A

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง จะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของชีวมวล ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน

ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้หลังกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวล

ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง

ส่วนที่ 4 การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็ง

ส่วนที่ 5 การวิเคราะห์ร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทอริแฟกชันชีวมวล ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน

ทำการเปรียบเทียบ ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบ ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิต่างกัน (ไม่มีการใช้วัสดุเบตร่วม) และชีวมวลที่ทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิและวัสดุเบตต่างกัน

4.1 สมบัติเบื้องต้นของชีวมวล

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ตามมาตรฐาน ASTM D3173-D3175 ซึ่งแสดงปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนคงตัวของชี้อ้อยและไม้กระถินยักษ์ ในตารางที่ 4.1 และแสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชี้อ้อยและไม้กระถินยักษ์เมื่อทอริแฟกชันโดยไม่ใช้และใช้วัสดุเบตร่วม ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ (as-received basis)

การวิเคราะห์แบบประมาณ	ซีลี้อย	ไม้กระถินยักษ์
ความชื้น (%)	3.91	4.27
สารระเหย (%)	76.65	72.35
คาร์บอนคงตัว (%)	18.4	21.82
เถ้า (%)	1.04	1.56

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์เมื่อทอริแฟกชันโดยไม้ใช้และใช้วัสดุเบดรวมต่างกัน (as-received basis)

ชนิดวัสดุเบด	วิเคราะห์แบบประมาณ	ชีวมวล : ซีลี้อย			ชีวมวล : ไม้กระถินยักษ์		
		อุณหภูมิ (°C)			อุณหภูมิ (°C)		
		200	250	300	200	250	300
ไม้ใช้วัสดุเบด	ความชื้น	1.21	0.81	0.76	2.13	1.63	1.61
	สารระเหย	56.92	46.84	35.4	47.15	30.59	27.99
	คาร์บอนคงตัว	40.22	50.56	61.97	48.75	65.62	68.27
	เถ้า	1.65	1.79	1.87	1.97	2.16	2.13
ทวาย	ความชื้น	0.69	0.43	0.34	1.01	0.82	0.56
	สารระเหย	56.44	34.79	20.64	45.44	27.99	20.18
	คาร์บอนคงตัว	39.99	61.52	75.43	50.38	67.98	75.78
	เถ้า	2.88	3.26	3.59	3.17	3.21	3.48
ซีโอไลต์ 3A	ความชื้น	0.57	0.28	0.19	0.85	0.38	0.25
	สารระเหย	43.31	36.32	18.94	43.31	26.24	18.28
	คาร์บอนคงตัว	52.14	59.14	76.52	52.05	69.23	77.13
	เถ้า	3.98	4.26	4.35	3.79	4.15	4.34
ซีโอไลต์ 5A	ความชื้น	0.62	0.27	0.21	0.72	0.47	0.25
	สารระเหย	42.51	33.77	18.33	42.51	24.85	18.11
	คาร์บอนคงตัว	53.06	61.94	76.95	53.06	70.72	77.41
	เถ้า	3.81	4.02	4.51	3.71	3.96	4.48

การวิเคราะห์แบบประมาณของซีลีเนียมและไม้กระถินยักษ์แสดงผลของการทดลองดังตารางที่ 4.1 จากการวิเคราะห์แบบประมาณ พบว่าไม้กระถินยักษ์มีร้อยละของปริมาณความชื้นคาร์บอน และเถ้า โดยน้ำหนักที่สูงกว่าซีลีเนียมเล็กน้อยคือ ร้อยละ 4.27, 21.82 และ 1.56 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนซีลีเนียมมีร้อยละของปริมาณสารระเหยโดยน้ำหนักที่สูงกว่าไม้กระถินยักษ์คือ ร้อยละ 76.65 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์แบบประมาณของซีลีเนียมและไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านการทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบด แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทอริแฟกชันเป็น 300 องศาเซลเซียสจะได้ร้อยละของปริมาณความชื้นและสารระเหยน้อยสุด ส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากที่สุด ในขณะที่ปริมาณเถ้าค่อนข้างคงที่คือเมื่อใช้ชีวมวลเป็นซีลีเนียมให้ร้อยละ ปริมาณของความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัวเป็น 0.76, 35.4 และ 61.9 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์ให้ร้อยละปริมาณของ ความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัวเป็น 1.61, 27.99 และ 68.27 โดยน้ำหนักตามลำดับ

การวิเคราะห์แบบประมาณของซีลีเนียมและไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านการทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ร่วมกับวัสดุเบด ททราย ซีโอล์ด 3A และ ซีโอล์ด 5A พบว่าการทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบดซีโอล์ด 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ผลดีลักษณะที่ตรงกันคือมีร้อยละของปริมาณความชื้นและสารระเหยที่น้อย และคาร์บอนคงตัวที่สูง โดยเมื่อใช้ชีวมวลเป็นซีลีเนียมจะให้ร้อยละของปริมาณความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัวเป็น 0.21, 18.33 และ 76.95 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์จะให้ร้อยละของปริมาณความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัวเป็น 0.25, 18.11 และ 77.41 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของซีลีเนียมและไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านการทอริแฟกชันในภาวะการทดลองต่างกัน พบว่า ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชัน(ไม่ใช้วัสดุเบด) จะมีปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ในผลิตภัณฑ์ที่ลดลง ส่วนคาร์บอนคงตัวและเถ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการทอริแฟกชัน ทำให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงแปรผกผันกับอุณหภูมิ ในขณะที่คาร์บอนคงตัวในผลิตภัณฑ์กลับเพิ่มขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิการทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณสารระเหยลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของสารระเหยเริ่มต้น (ปริมาณสารระเหยเริ่มต้นของวัตถุดิบ แสดงค่าในตารางที่ 4.1)

ในการทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบดต่างๆ พบว่าสามารถส่งเสริมให้มีการปลดปล่อยสารระเหยได้มากขึ้น โดยสารระเหยที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ลดลงประมาณ 4 เท่าของสารระเหยเริ่มต้นจากชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบ และประมาณ 2 เท่าของการทอริแฟกชันชีวมวลโดย

ไม่ใช้วัสดุเบตร่วม โดยทั้งขี้เถ้าและไม้กระถินยักษ์ให้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

ในกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวลนั้น ปกติเฮมิเซลลูโลสจะเป็นองค์ประกอบที่เกิดการสลายตัวอย่างมาก ซึ่งเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลจะเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และปลดปล่อยสารระเหยอย่างเต็มที่ (full devolatilisation) เมื่ออุณหภูมิประมาณ 320 องศาเซลเซียส [Bridgeman et al., 2008] ซึ่งคาดว่า การใช้วัสดุเบตร่วมจะช่วยชีพอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหยให้เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า หรืออาจทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ดีขึ้น โดยวัสดุเบตเป็นเสมือนตัวกักเก็บความร้อน (heat capacity) จึงเกิดการกระจายตัวของความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้วัสดุเบตร่วมที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของการทอริแฟกชันชีวมวลนั่นเอง ดังนั้นปัจจัยของประสิทธิภาพทางความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์น่าจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวล

การทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบตที่ต่างชนิดกันให้ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุที่ไม่ค่อยแตกต่างกันมาก และเมื่อใช้วัสดุเบตเป็นซีโอไลต์ A ซึ่งเป็นวัสดุเบตที่มีความเป็นรูพรุน มีความสามารถดูดซับโมเลกุลของแก๊สผลิตภัณฑ์ในกระบวนการทอริแฟกชัน โดยซีโอไลต์ 3A ดูดซับโมเลกุลของน้ำ ส่วนซีโอไลต์ 5A ดูดซับโมเลกุลของน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ทอริแฟกชันร่วมกับซีโอไลต์ จะมีสารระเหย ความชื้น มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อใช้ทอริแฟกชันร่วมกับวัสดุเบตเล็กน้อย

นอกจากนั้น พบว่า ชีวมวลที่ทอริแฟกชันร่วมกับวัสดุเบตจะมีค่าคาร์บอนที่ใกล้เคียงถ่านหินมากขึ้น โดยคำนวณค่าคาร์บอนที่ใกล้เคียงจากสมการที่ 4.1 [กัญญา นุณยเกียรติ, 2531]

$$\text{อัตราส่วนเชื้อเพลิง} = \frac{\text{คาร์บอนคงตัว (FC)}}{\text{สารระเหย (VM)}} \quad (\text{สมการ 4.1})$$

อัตราส่วนของเชื้อเพลิงเป็นค่าที่สามารถบอกถึงค่าคาร์บอนที่ถ่านหินได้ โดยพบว่าเมื่อทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบตชนิดต่างๆ ขี้เถ้าจะให้ค่าคาร์บอนที่ใกล้เคียงอยู่ในช่วง 0.70 ถึง 4.2 ส่วนไม้กระถินยักษ์มีค่าคาร์บอนที่ 1.11 ถึง 4.27 ซึ่งอยู่ในช่วงคาร์บอนที่ถ่านหินบิทูมินัสคือที่ ช่วง 0.5 ถึง 3.0 และค่าคาร์บอนที่ถ่านหินเซมิบิทูมินัส ที่ช่วง 3.0 ถึง 7.0 ดังนั้นการทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบต ให้ค่าคาร์บอนที่ใกล้เคียงถ่านหินมากกว่าการทอริแฟกชันชีวมวลโดยไม่ใช้วัสดุเบต และชีวมวลที่ไม่ผ่านการทอริแฟกชันซึ่งมีค่าคาร์บอนที่ใกล้เคียงในช่วง 0.7 ถึง 2.5 และช่วง 0.24 ถึง 0.30 ตามลำดับ (แสดงตารางเปรียบเทียบช่วงคาร์บอนที่ถ่านหินในภาคผนวก ค.)

4.1.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ตามมาตรฐาน ASTM D5291-D5296 ด้วยเครื่อง CHN Analysis ซึ่งวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ แสดงในตารางที่ 4.3 และผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์เมื่อทอริแฟกชันโดยไม่ใช้และใช้วัสดุเบดรวม แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ (dry ash free basis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ซีลี้อย	ไม้กระถินยักษ์
คาร์บอน : C	59.54	53.08
ไฮโดรเจน : H	6.63	6.57
ออกซิเจน : O	33.75	40.26
ไนโตรเจน : N	0.08	0.08

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ดังตารางที่ 4.3 พบว่าไม้กระถินยักษ์มีร้อยละของปริมาณองค์ประกอบของธาตุออกซิเจนที่สูงกว่าซีลี้อยคือ ร้อยละ 40.26 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ซีลี้อยมีปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนที่สูงกว่าคือ ร้อยละ 59.54 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านการทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบด ดังตารางที่ 4.4 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทอริแฟกชันจะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีปริมาณออกซิเจนลดลง ส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิการทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีร้อยละขององค์ประกอบออกซิเจนต่ำสุด และคาร์บอนสูงสุด คือเมื่อใช้ชีวมวลเป็นซีลี้อยให้ร้อยละของออกซิเจนและคาร์บอนเป็น 25.21 และ 69.91 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยเมื่อใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์ให้ร้อยละของออกซิเจนและคาร์บอนเป็น 30.81 และ 63.71 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านการทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ร่วมกับวัสดุเบด ทราย ซีโอไลต์ 3A และ ซีโอไลต์ 5A ดังตารางที่ 4.4 พบว่าการทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบดซีโอไลต์ 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศา

เซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เหมาะสมคือมีร้อยละของปริมาณออกซิเจนน้อยสุด และคาร์บอนคงตัวสูงสุด โดยเมื่อใช้ชีวมวลเป็นชี้เลี้ยงจะให้ร้อยละของออกซิเจน และคาร์บอนเป็น 14.26 และ 82.23 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์จะให้ร้อยละของปริมาณออกซิเจน และคาร์บอนเป็น 20.75 และ 73.75 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชี้เลี้ยงและไม้กระถินยักษ์ของชี้เลี้ยงและไม้กระถินยักษ์เมื่อทอริแฟกชันโดยไม่ใช้และใช้วัสดุเบตร่วมต่างๆ (dry ash free basis)

ชนิดวัสดุ เบต	วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ชีวมวล : ชี้เลี้ยง			ชีวมวล : ไม้กระถินยักษ์		
		อุณหภูมิ (°C)			อุณหภูมิ (°C)		
		200	250	300	200	250	300
ไม่ใช้วัสดุ เบต	คาร์บอน : C	60.08	68.41	69.91	57.45	60.11	63.71
	ไฮโดรเจน : H	4.33	3.62	4.44	4.65	3.91	3.56
	ออกซิเจน : O	29.99	27.52	25.21	36.27	34.15	30.81
	ไนโตรเจน : N	0.45	0.45	0.44	1.64	1.83	1.91
ทราย	คาร์บอน : C	65.23	68.41	77.07	61.96	65.54	69.74
	ไฮโดรเจน : H	4.33	3.62	2.70	3.86	3.75	3.64
	ออกซิเจน : O	29.99	27.52	19.64	32.37	28.87	24.77
	ไนโตรเจน : N	0.45	0.45	0.59	1.81	1.83	1.85
ชีโอดี 3A	คาร์บอน : C	67.16	74.04	80.57	64.25	69.08	73.39
	ไฮโดรเจน : H	4.79	4.35	3.81	4.34	3.49	3.22
	ออกซิเจน : O	27.68	21.16	15.10	29.87	25.84	21.74
	ไนโตรเจน : N	0.38	0.45	0.52	1.54	1.59	1.66
ชีโอดี 5A	คาร์บอน : C	68.04	74.89	82.23	65.65	70.20	73.75
	ไฮโดรเจน : H	4.72	4.35	2.95	3.63	3.91	4.08
	ออกซิเจน : O	26.88	20.35	14.26	29.17	24.40	20.75
	ไนโตรเจน : N	0.36	0.41	0.56	1.55	1.49	1.42

ในการทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบตให้แนวโน้มของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้มีปริมาณออกซิเจนที่น้อยกว่าการทอริแฟกชันชีวมวลโดยไม่ใช้วัสดุเบตร่วม ซึ่งการลดลงของปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ผ่านการทอริแฟกชันนั้น คาดว่าเป็นผลจากการที่เฮมิ

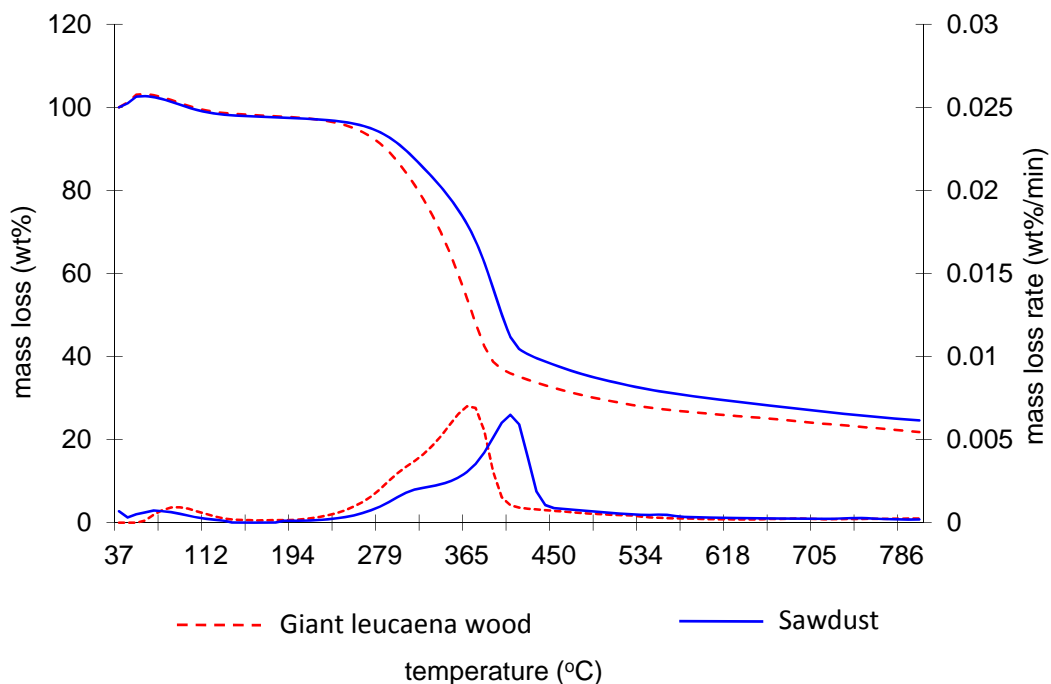
เซลลูโลสในชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนแล้วเกิดการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ จากนั้นเกิดการพอร์มตัวในรูปของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เป็น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอริแฟกชัน [Mark et al., 2006] เป็นผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีองค์ประกอบธาตุออกซิเจนที่ลดลง

นอกจากนี้ปัจจุบันการใช้ชีวมวลเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว (bio-oil) กำลังประสบปัญหาจากการที่ชีวมวลมีองค์ประกอบออกซิเจนที่สูง ทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีสภาพเป็นกรด ซึ่งเกิดการออกซิไดซ์ของน้ำมันชีวภาพกับออกซิเจนได้ง่ายและก่อให้เกิดการกัดกร่อนของตัวถังที่ใช้บรรจุเชื้อเพลิง ดังนั้นเบื้องต้นคาดว่า การใช้ชีวมวลที่มีการปรับปรุงด้วยการทอริแฟกชันชีวมวลให้มีออกซิเจนที่น้อยลงคาดว่าจะ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงน้ำมันชีวภาพ

4.1.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนด้วย TGA

ความสัมพันธ์ของการสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยและไม้กระถินยักษ์ แสดงดังรูปที่

4.1



รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยและไม้กระถินยักษ์

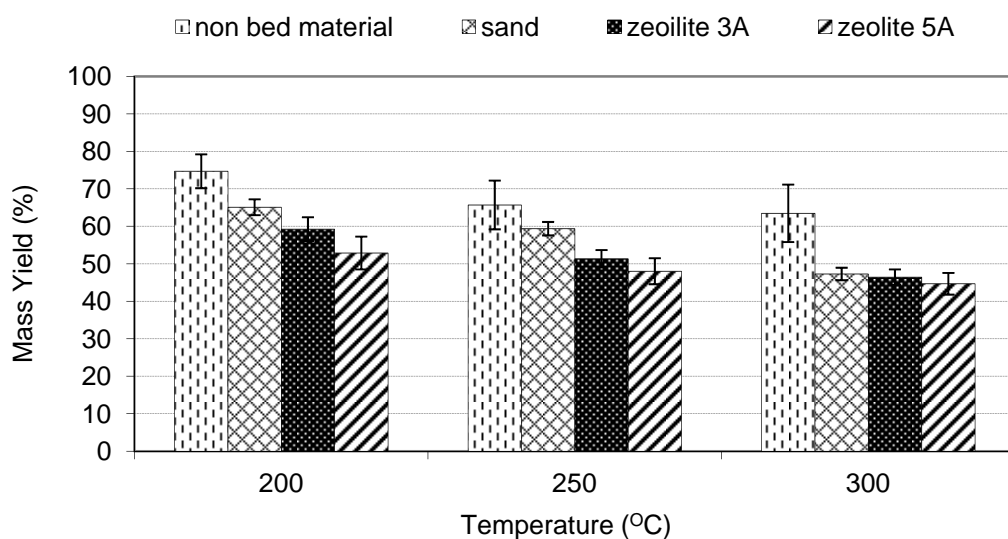
การสลายตัวทางความร้อนของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ จากรูปที่ 4.1 พบว่าซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์เกิดการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 410 และ 365 องศาเซลเซียส โดยทั้งซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์สลายตัวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส

4.2 การวิเคราะห์ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง (Mass Yield)

ความสัมพันธ์ของร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยน้ำหนักที่ได้จากชีวมวลที่ทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ และวัสดุเบดต่างกัน แสดงสูตรการคำนวณดังสมการที่ 4.1 และแสดงผลของร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยน้ำหนักของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$Y_{mass}(\%) = \left(\frac{m_{product}}{m_{feed}} \right) \times 100 \quad (\text{สมการที่ 4.2})$$

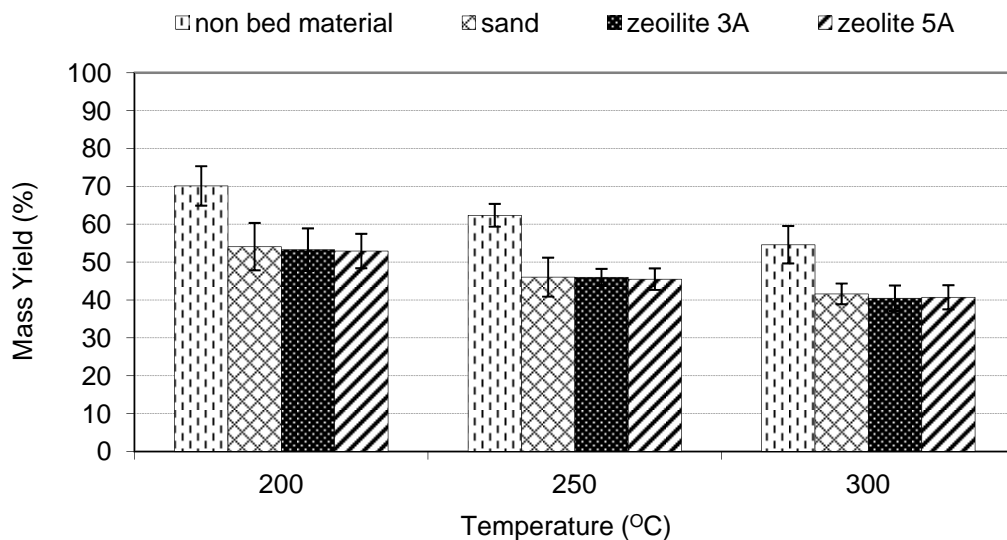
เมื่อ $m_{product}$: น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็ง
 m_{feed} : น้ำหนักชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยน้ำหนักของซีลี้อยเมื่อทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ทราาย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยน้ำหนักที่ทอริแฟกชันชีวมวลด้วยอุณหภูมิ และวัสดุเบดต่างกัน ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของการทอริแฟกชันชีวมวล

มวลเพิ่มขึ้น จะทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้มีปริมาณที่ลดลง ซึ่งทั้งซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์มีแนวโน้มผลการทดลองเช่นเดียวกัน โดยที่ภาวะการทดลองเดียวกันร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการทอริแฟกชันซีลี้อยมีปริมาณที่สูงกว่าไม้กระถินยักษ์ทุกกรณี โดยเมื่อทอริแฟกชันซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสร่วมกับวัสดุเบดเป็นซีโอไลต์ 5A ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งน้อยสุดคือ 44.67 และ 40.74 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง โดยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์เมื่อทอริแฟกชันด้วย อุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ทราาย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ

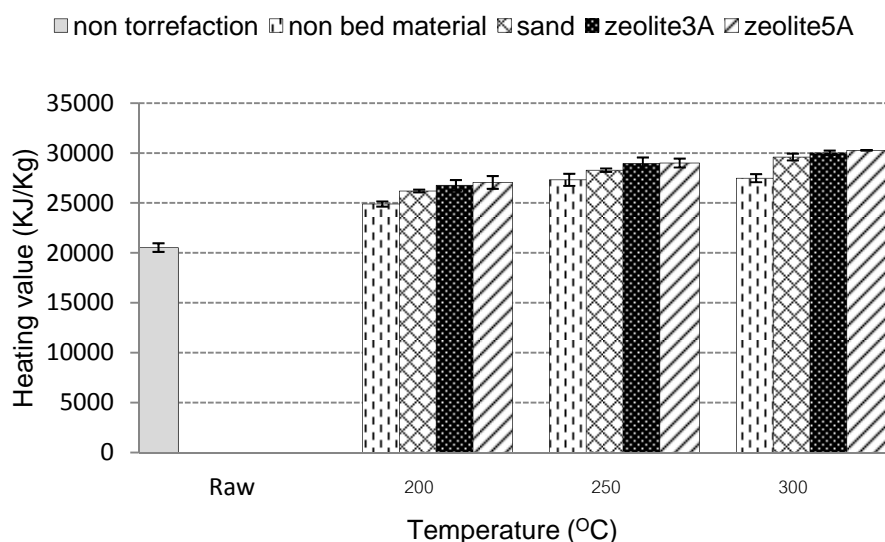
ในการวิเคราะห์ร้อยละผลิตภัณฑ์ของของแข็งโดยน้ำหนักที่ทอริแฟกชันชีวมวลด้วย เจริญไขการทดลองเดียวกันนั้น ก็จะทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของของแข็งโดยน้ำหนักเมื่อใช้ชีวมวลเป็นซีลี้อยที่สูงกว่าเมื่อใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์ ซึ่งคาดว่าจากพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของซีลี้อยและไม้กระถินยักษ์ ดังรูปที่ 4.1 ได้ชี้ให้เห็นว่าซีลี้อยสลายตัวทางความร้อนได้ยากกว่าไม้กระถินยักษ์และมีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่า นอกจากนั้นผลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.3) พบว่าไม้กระถินยักษ์มีปริมาณองค์ประกอบออกซิเจนที่สูงกว่า นั่นคือมีนัยสำคัญที่แสดงถึงปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่มากกว่าในชีวมวลเชิงเปรียบเทียบ เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบทางเคมีในชีวมวลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก และเป็นองค์ประกอบในชีวมวลที่มีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำกว่า เซลลูโลสและลิกนิน ดังนั้นการทอริแฟกชันซีลี้อยจึงให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของของแข็งที่ได้สูงกว่า การทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์ในภาวะการทดลองเดียวกัน อีกทั้งในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง

ประมาณ 250 องศาเซลเซียสจะเห็นได้ว่าไม้กระถินยักษ์มีการลดลงของร้อยละผลิตภัณฑ์ของของแข็งที่ค่อยข้างรวดเร็วกว่าซีลี้อย ซึ่งการลดลงของน้ำหนักผลิตภัณฑ์จะเกี่ยวข้องกับปริมาณของความชื้นและองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสเริ่มต้นในชีวมวล ซึ่งจากตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์แบบประมาณ พบว่าไม้กระถินยักษ์มีความชื้นเริ่มต้นที่สูงกว่าซีลี้อย โดยความชื้นเกิดการลดลงจากกระบวนการระเหยด้วยความร้อนของน้ำอิสระ (free water) ที่อยู่บนผิวน้ำและระหว่างโมเลกุลของชีวมวลและการเกิดการดีไฮเดรชัน (dehydration) ของน้ำในโครงสร้างโมเลกุล (bound water) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาและปลดปล่อยในรูปน้ำจำนวนมากในช่วงอุณหภูมิที่รวมทั้งยังมีการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุล (depolymerization) ของเฮมิเซลลูโลสในชีวมวล ดังนั้นชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นและเฮมิเซลลูโลสสูงจึงให้ผลของการลดลงของร้อยละของของแข็งที่รวดเร็วกว่าหากกระบวนการทางความร้อนมีประสิทธิภาพเพียงพอ

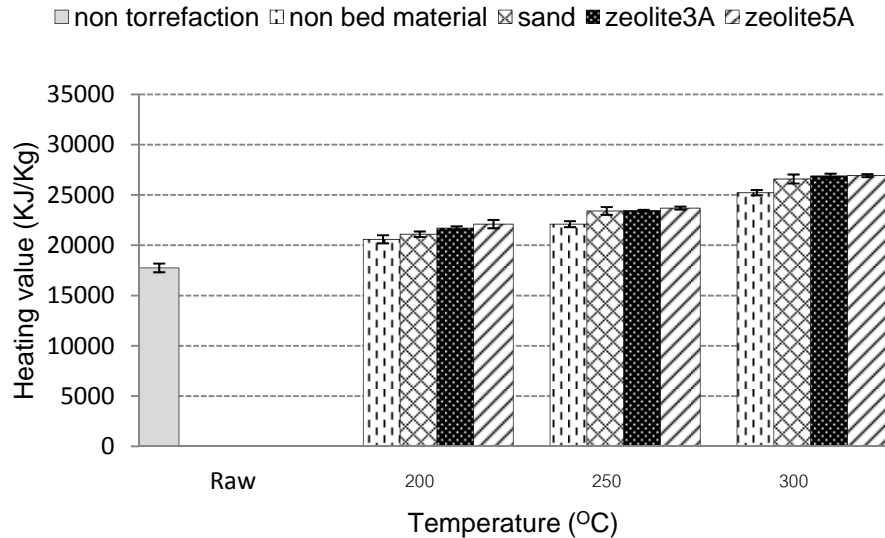
4.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating Value)

4.3.1 ค่าความร้อน (Heating Value)

ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งจากชีวมวลที่ทอริฟแฟกชันด้วยอุณหภูมิ และวัสดุเบดต่างกัน วิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยบอร์มแคลอริมิเตอร์ และแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (dry basis) ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งจากซีลี้อยที่เป็นวัตถุดิบ และซีลี้อยที่ทอริฟแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็นทราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งจากไม้กระถินยักษ์ที่เป็นวัตถุดิบ และไม้กระถินยักษ์ที่ทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ และใช้วัสดุเบดเป็น ททราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของชี้เลื่อยและไม้กระถินยักษ์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ พบว่าชี้เลื่อยมีค่าความร้อนที่สูงกว่าไม้กระถินยักษ์ คือ ชี้้เลื่อยมีค่าความร้อนประมาณ 20.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และไม้กระถินยักษ์มีค่าความร้อน 17.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งจากการทอริแฟกชันชี้เลื่อยและไม้กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียสและเมื่อไม่ใช้วัสดุเบดร่วม พบว่าเมื่ออุณหภูมิของการทอริแฟกชันเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น โดยที่ภาวะการทดลองเดียวกันเมื่อใช้ชีวมวลเป็นชี้เลื่อยจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความร้อนสูงกว่าเมื่อใช้ไม้กระถินยักษ์ คือ ค่าความร้อนที่ได้ประมาณ 24.9 , 27.3 และ 27.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่ออุณหภูมิของการทอริแฟกชันชี้เลื่อยเป็น 200, 250 และ 300 ตามลำดับ โดยเมื่อทอริแฟกชันชี้เลื่อยร่วมกับวัสดุเบดซีโอไลต์ 5A จะให้ค่าความร้อนสูงสุดคือที่ประมาณ 30.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ในผลการทดลองจากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการทอริแฟกชันชี้เลื่อยและไม้กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิและวัสดุเบดต่างกัน และได้ทำการคำนวณค่าความร้อนจากความสัมพันธ์ขององค์ประกอบธาตุในชีวมวล (ซึ่งแสดงองค์ประกอบธาตุ ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4) ตามสมการของเดเมียบาส แสดงสูตรการคำนวณดังสมการที่ 4.3 [Demirbas et al., 1991)

$$HHV \left(\frac{MJ}{Kg} \right) = 33.5 C + 142.3 H - 15.4 O - 24.5 N \quad (\text{สมการที่ 4.3})$$

จากการคำนวณค่าความร้อนของชี้เลี้ยงและไม้กระถินยักษ์ตามสมการที่ 4.3 พบว่า ชี้เลี้ยงและไม้กระถินยักษ์ที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นมีค่าความร้อนประมาณ 22.18 และ 18.75 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งชี้เลี้ยงก็ให้ค่าความร้อนสูงกว่าไม้กระถินยักษ์ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองเช่นกัน โดยผลการทดลองมีค่าความร้อนที่น้อยกว่าค่าความร้อนที่ได้จากสมการของเดเมียบาสและมีความคลาดเคลื่อนจากสมการของเดเมียบาสประมาณ 7.57 และ 5.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในการทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบตนั้นพบว่าให้ค่าทางความร้อนที่สูงกว่าการทอริแฟกชันชีวมวลโดยไม่ใช้วัสดุเบตร่วม ซึ่งเป็นผลจากการที่ผลิตภัณฑ์ของแข็งจากชีวมวลที่ทอริแฟกชันร่วมกับวัสดุเบตจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น (แสดงค่าสัดส่วนขององค์ประกอบคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ ดังตารางที่ 4.4) ซึ่งตามสมการของเดเมียบาสจะเห็นได้ว่าพจน์แรกมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของคาร์บอนในชีวมวล ซึ่งพจน์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อค่าความร้อนที่ได้ ดังนั้นการที่คาร์บอนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจึงให้ความสัมพันธ์เชิงบวกต่อค่าความร้อนในผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยเมื่อทอริแฟกชันชี้เลี้ยงและไม้กระถินยักษ์กับวัสดุเบตซีโอไลต์ 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่าทางความร้อนสูงสุดประมาณ 30.2 และ 27.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม หรือให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นคิดเป็นประมาณ 47 และ 55 เปอร์เซ็นต์ของค่าความร้อนจากชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งจะเห็นว่าค่าความร้อนในการทดลองยังน้อยกว่าค่าตามสมการเนื่องจากอาจมีการสูญเสียความร้อนในระบบเกิดขึ้น

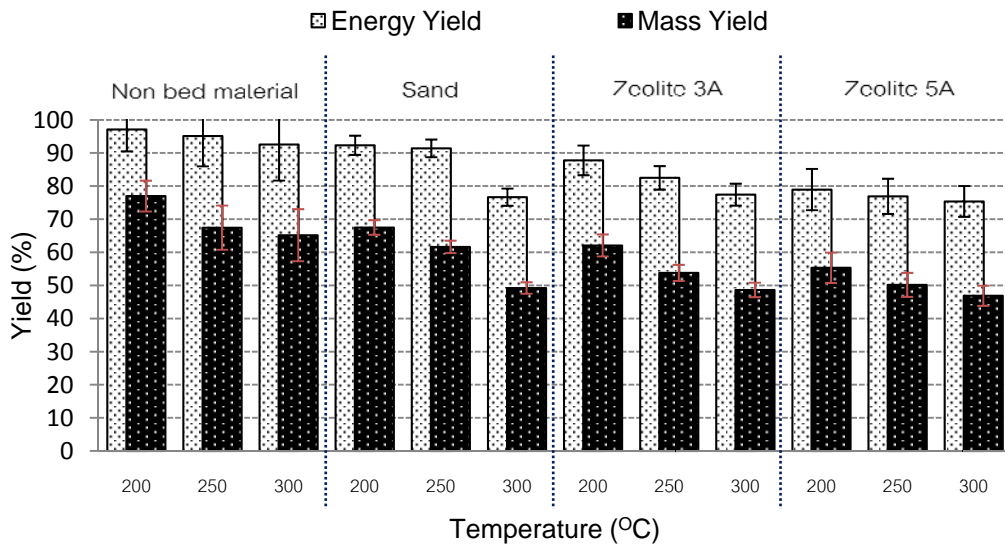
4.3.2 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ และร้อยละของพลังงานที่ได้

ความสัมพันธ์ของร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้และร้อยละของพลังงานที่ได้เมื่อทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิ และวัสดุเบตต่างกันของชี้เลี้ยงและไม้กระถินยักษ์ และคำนวณหาร้อยละพลังงานที่ได้ตามสมการที่ 4.4 (dry free ash basis) [Bergman et al., 2004]

$$Y_{energy}(\%) = Y_{mass} \left(\frac{HHV_{product}}{HHV_{feed}} \right)_{daf} \quad (\text{สมการที่ 4.4})$$

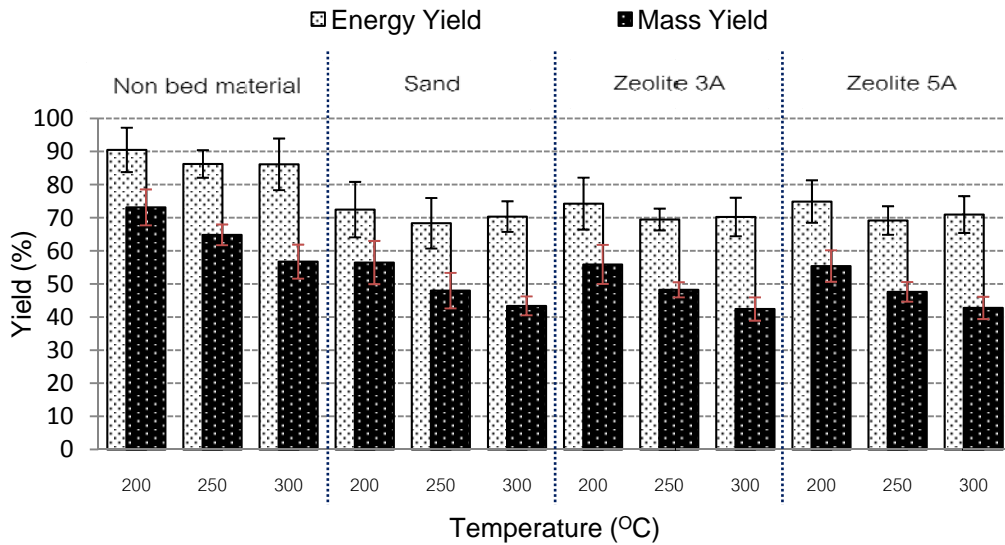
เมื่อ	Y_{mass}	: ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ (dry ash free basis)
	Y_{energy}	: ร้อยละพลังงานที่ได้
	$HHV_{product}$: ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง
	HHV_{feed}	: ค่าความร้อนของชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้และร้อยละของพลังงานที่ได้เมื่อทอริแฟกชันซีลีออยและไม้กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิ และวัสดุเบตต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้และร้อยละของพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของแข็งเมื่อทอริแฟกชันซีลีออยด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบต และใช้วัสดุเบตเป็น ทราาย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ

การวิเคราะห์ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ และร้อยละผลิตภัณฑ์พลังงานที่ได้ของผลิตภัณฑ์ที่ทอริแฟกชันซีลีออยและไม้กระถินยักษ์ ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 โดยการทอริแฟกชันซีลีออยและไม้กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบตร่วมพบว่าที่อุณหภูมิของการทดลองเดียวกัน ซีลีออยจะให้ผลของร้อยละผลิตภัณฑ์และร้อยละพลังงานที่ได้สูงกว่าการใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์ ซึ่งค่าร้อยละผลิตภัณฑ์จะลดลงและร้อยละพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการทอริแฟกชันเพิ่มขึ้น และเมื่อทอริแฟกชันซีลีออยที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียสให้ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งเป็น 77, 67, 65 โดยน้ำหนัก และให้ค่าร้อยละพลังงานที่ได้เป็น 94, 92, 90 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



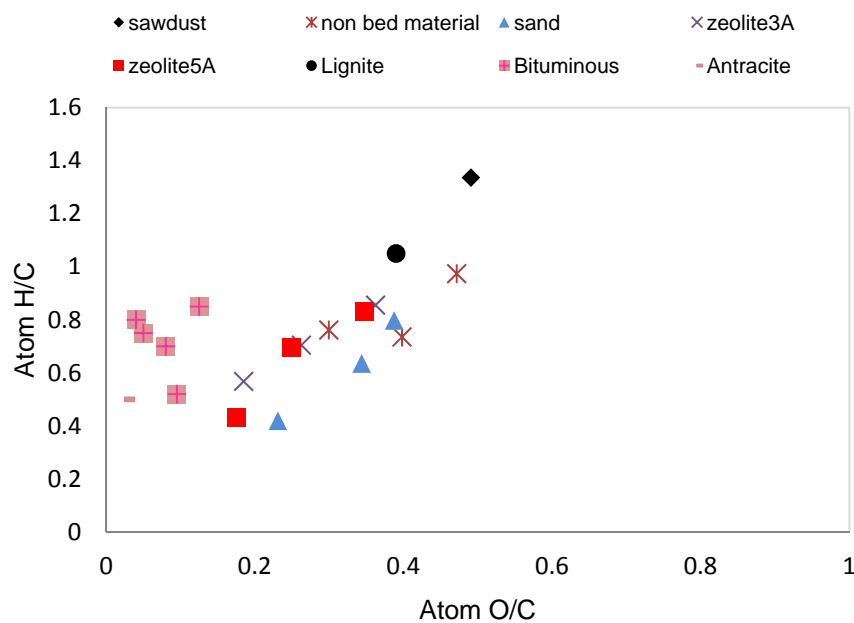
รูปที่ 4.7 แสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้และร้อยละของพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของของแข็งเมื่อทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบดและใช้วัสดุเบดเป็น ทราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งต่อร้อยละพลังงานที่ได้จะสังเกตได้ว่าร้อยละของพลังงานที่ได้จะสูงกว่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้เสมอที่ภาวะการทดลองเดียวกัน แสดงให้เห็นแม้ผลิตภัณฑ์ของแข็งจะมีปริมาณที่น้อยลง แต่พลังงานที่ได้ยังมีความมากกว่าการสูญเสียไปของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ [Bridgeman et al., 2007] โดยร้อยละของพลังงานที่ได้จะเปรียบเทียบกับร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เงื่อนไขนั้นๆ เช่น เมื่อทอริแฟกชันซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 300 องศา วัสดุเบดที่ใช้เป็น ซีโอไลต์ 5A จะได้รับร้อยละของพลังงานที่ได้ 71 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ 46 โดยน้ำหนัก (ค่าการทดลองจากรูปที่ 4.6) ซึ่งผลต่างระหว่างร้อยละของพลังงานที่ได้ต่อร้อยละผลิตภัณฑ์นั้นจะชี้ถึงแนวโน้มของความหนาแน่นพลังงานในผลิตภัณฑ์ของของแข็ง ซึ่งจากการทดลองพบว่า การทอริแฟกชันชีวมวลทั้งสองชนิดเมื่อใช้อุณหภูมิทอริแฟกชันเพิ่มขึ้นจะให้ผลต่างระหว่างร้อยละของผลิตภัณฑ์ต่อร้อยละพลังงานที่ได้เพิ่มขึ้น นั่นคือการใช้อุณหภูมิของการทอริแฟกชันเพิ่ม จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีแนวโน้มความหนาแน่นพลังงานที่สูงขึ้น และเมื่อใช้วัสดุเบดรวมกับการทอริแฟกชันกลับให้ค่าผลต่างระหว่างร้อยละของผลิตภัณฑ์ต่อร้อยละพลังงานที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อไม่ใช้และใช้วัสดุเบดรวม แม้ว่าจะไม่สามารถบอกแนวโน้มของความหนาแน่นพลังงานได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากการเก็บผลิตภัณฑ์ของแข็งอาจมีของแข็งตกค้างอยู่บริเวณตะแกรงที่ใช้แยกวัสดุเบดออกจากผลิตภัณฑ์ของแข็ง หรือตกค้างในเครื่องปฏิกรณ์ แต่ถึงอย่างไรก็ดี ผลจากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ก็สามารถชี้ให้เห็นว่าการทอริแฟกชันซีโอไลต์ร่วมกับซี

โอไลต์ 5A ให้ค่าความร้อนสูงสุด และการทอริแฟกชันร่วมกับวัสดุเบดให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการทอริแฟกชันโดยไม่ใช้วัสดุเบด

4.4 สมบัติเชื้อเพลิงของแข็งของชีวมวล (Solid Fuel Property)

แสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนอะตอมของธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของถ่านหินผลิตภัณฑ์ของแข็งของชี้อย่างที่ไม่ผ่านและผ่านการทอริแฟกชันเมื่อไม่ใช้และใช้วัสดุเบดร่วม ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

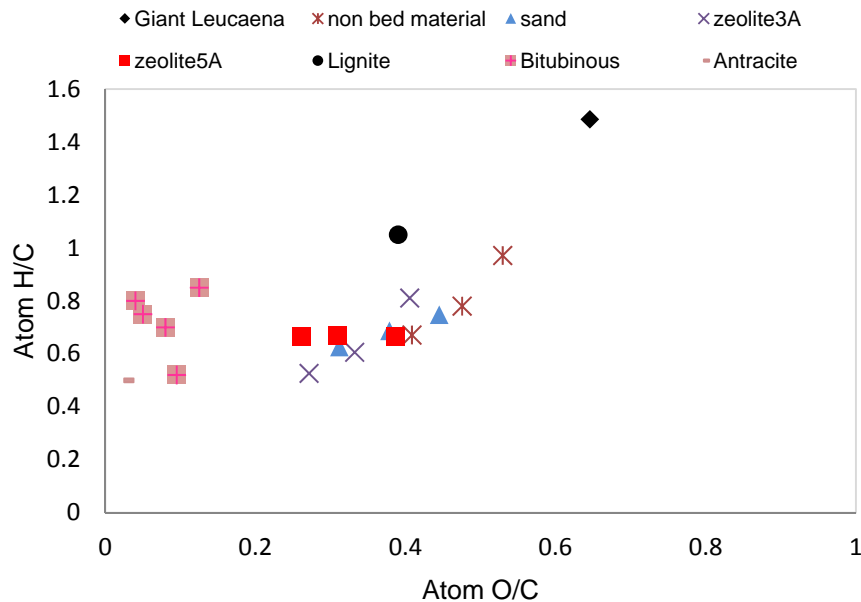


รูปที่ 4.8 แสดงสัดส่วนอะตอมของธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของถ่านหินลิกไนท์ บิทูมินัส แอนทราไซต์ ผลิตภัณฑ์ของแข็งเมื่อทอริแฟกชันชี้อยู่ด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบด และใช้วัสดุเบดเป็น ทราาย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ

การวิเคราะห์สัดส่วนของอะตอม O/C และ H/C ของชี้อย่างที่ใช้เป็นวัสดุดิบ (ไม่ผ่านการทอริแฟกชัน) ให้ค่าสัดส่วนอะตอมเป็น 0.49 และ 1.34 ตามลำดับ เมื่อทอริแฟกชันชี้อยู่ด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ให้แนวโน้มสัดส่วนของ O/C และ H/C ที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ คือ สัดส่วนอะตอม O/C เป็น 0.47, 0.40, 0.30 และ สัดส่วนอะตอม H/C เป็น 0.97, 0.73, 0.76 ตามลำดับ ซึ่งมีสัดส่วนอะตอมที่ใกล้เคียงถ่านหินลิกไนท์

การวิเคราะห์สัดส่วนของอะตอม O/C และ H/C ของชี้อย่างที่ทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิและวัสดุเบดต่างกัน ให้สัดส่วนของ O/C และ H/C ที่น้อยกว่าการทอริแฟกชันโดยไม่ใช้วัสดุเบด

รวมและเมื่อทอริแฟกชันซีเลี่ยร่วมกับวัสดุเบตซีโอไลต์ 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ สัดส่วนอะตอม O/C และ H/C ที่ใกล้เคียงถ่านหินบิทูมินัส คือมีสัดส่วนอะตอม O/C และ H/C เป็น 0.18 และ 0.43 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 แสดงสัดส่วนอะตอมของของธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของถ่านหินลิกไนท์ บิทูมินัส แอนทราไซต์ ผลิตภัณฑ์ของของแข็งเมื่อทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์ ด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้วัสดุเบต และใช้วัสดุเบตเป็นทราย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ

การวิเคราะห์สัดส่วนของอะตอม O/C และ H/C ของไม้กระถินยักษ์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (ไม่ผ่านการทอริแฟกชันให้ค่าสัดส่วนอะตอมเป็น 0.65 และ 1.49 ตามลำดับ เมื่อทอริแฟกชันซีเลี่ยด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียสให้แนวโน้มสัดส่วนของ O/C และ H/C ที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเมื่อเทียบกับชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบ คือ สัดส่วนอะตอม O/C เป็น 0.52, 0.48, 0.41 และ สัดส่วนอะตอม H/C เป็น 0.97, 0.78, 0.67 ตามลำดับ ซึ่งมีสัดส่วนอะตอมที่ใกล้เคียงถ่านหินลิกไนท์

การวิเคราะห์สัดส่วนของอะตอม O/C และ H/C ของไม้กระถินยักษ์ที่ทอริแฟกชันด้วยอุณหภูมิและวัสดุเบตต่างกัน ให้สัดส่วนของ O/C และ H/C ที่น้อยกว่าการทอริแฟกชันโดยไม่ใช้วัสดุเบตรวมและเมื่อทอริแฟกชันซีเลี่ยร่วมกับวัสดุเบตซีโอไลต์ 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้สัดส่วนอะตอม O/C และ H/C ที่ใกล้เคียงถ่านหินบิทูมินัส คือมีสัดส่วนอะตอม O/C

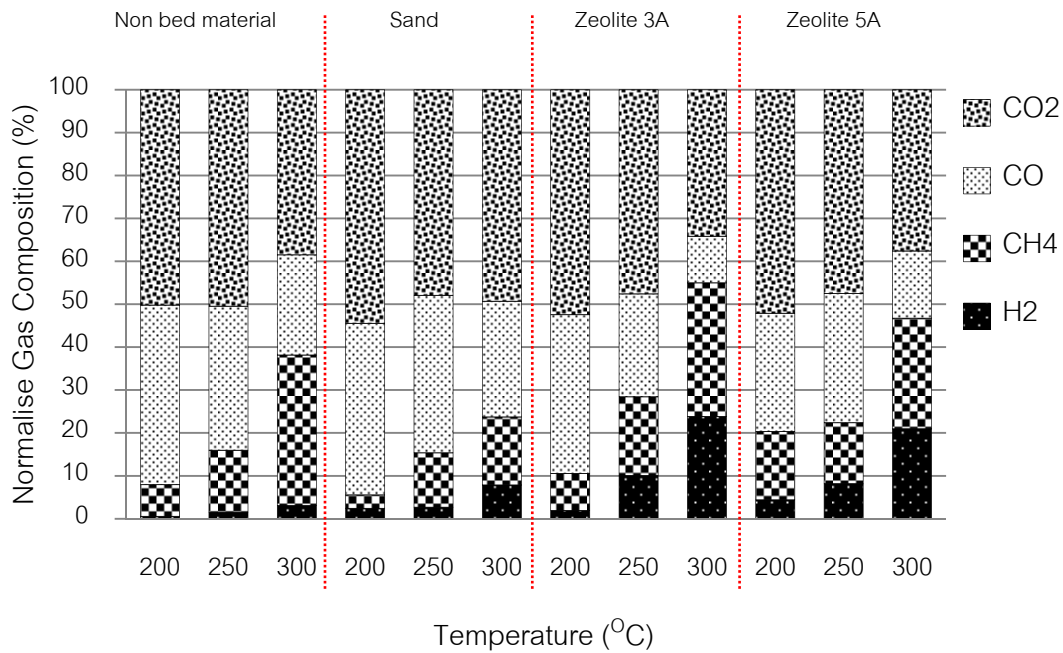
และ H/C เป็น 0.26 และ 0.66 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่าชีลื้อยและไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านกระบวนการทอรรีแพกชันจะให้แนวโน้มสัดส่วนอะตอม O/C และ H/C ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทอรรีแพกชันเพิ่มขึ้น และให้สัดส่วนอะตอมใกล้เคียงถ่านหินลิกไนท์ และทอรรีแพกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบดมีแนวโน้มให้สมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ใกล้เคียงกับถ่านหินบิทูมินัสมากขึ้น โดยสอดคล้องกับผลการทดลองของการวิเคราะห์แบบประมาณที่ให้ผลของอัตราเชื้อเพลิง FC/VM มีค่าของศักย์เชื้อเพลิงอยู่ในช่วงของถ่านหินบิทูมินัสเช่นเดียวกัน โดยเมื่อทอรรีแพกชันชีลื้อยร่วมกับวัสดุเบดชีโพลีต์ 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้สมบัติทางเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงถ่านหินบิทูมินัสมากที่สุด อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทอรรีแพกชันและใช้วัสดุเบดร่วมทำให้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสในผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงส่งผลให้สัดส่วนเซลลูโลสและลิกนินในผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งลิกนินเป็นองค์ประกอบทางเคมีในชีวมวลที่มีโครงสร้างโมเลกุลใกล้เคียงถ่านหินมากที่สุด

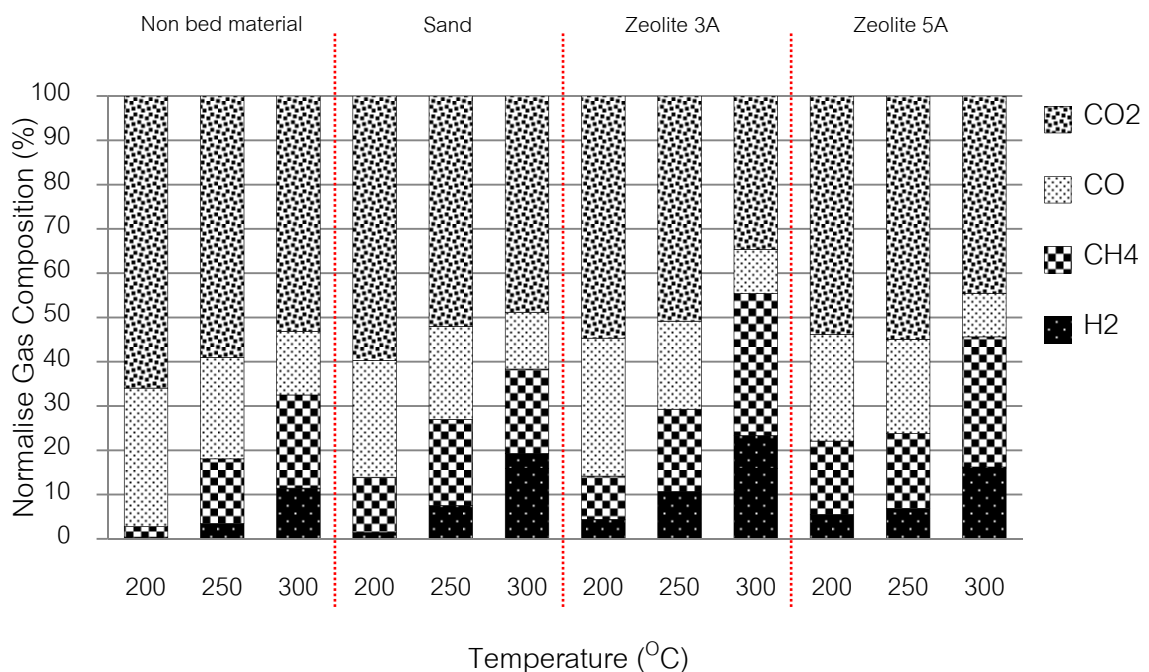
4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน ที่เกิดขึ้นในการทอรรีแพกชันชีลื้อยและไม้กระถินยักษ์ด้วยอุณหภูมิและวัสดุเบดต่างกัน ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11

การวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทอรรีแพกชันชีลื้อยเมื่อไม่ใช้วัสดุเบด พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ให้สัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ รองลงมาคือคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ ไฮโดรเจน คิดเป็นร้อยละ 50.20, 42.9, 7.09 และ 0.59 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 300 องศาเซลเซียส ให้สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลงส่วนสัดส่วนมีเทนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นคิดร้อยละเป็น 38.33, 23.61, 34.97 และ 3.09 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่อทอรรีแพกชันชีลื้อยร่วมกับวัสดุเบดจะให้ผลของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน แต่มีแนวโน้มของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สที่เหมือนกัน



รูปที่ 4.10 แสดงร้อยละขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทอริแฟกชันซีเลียมเมื่อทอริแฟกชันซีเลียมด้วยอุณหภูมิ 200, 250, 300 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้และใช้วัสดุเบดร่วมเบด และใช้วัสดุเบดเป็น ทราาย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 แสดงร้อยละขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทอริแฟกชันไม่กระถินยักษ์เมื่อไม่ใช้และใช้วัสดุเบดร่วมเบด และใช้วัสดุเบดเป็น ทราาย ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 5A ตามลำดับ

การวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์เมื่อไม่ใช้วัสดุเบด พบว่า ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสให้สัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ รองลงมาคือคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ ไฮโดรเจน คิดเป็นร้อยละ 66.96, 31.28, 2.36 และ 0.40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 300 องศาเซลเซียสให้สัดส่วนของ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลงส่วนสัดส่วนมีเทนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 53.11, 14.38, 21.04 และ 11.47 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่อทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์ร่วมวัสดุเบดจะให้ผลของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน แต่มีแนวโน้มของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกัน

จากผลการทดลองที่ศึกษาสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ชีวมวลเป็นชีลี้อย และไม้กระถินยักษ์จะมีแนวโน้มผลการทดลองในลักษณะเดียวกันคือที่อุณหภูมิของการทอริแฟกชันเป็น 200 องศาเซลเซียสเมื่อไม่ใช้และใช้วัสดุเบดจะให้แนวโน้มของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ของ คาร์บอนไดออกไซด์ > คาร์บอนมอนอกไซด์ > มีเทน > ไฮโดรเจน และเมื่ออุณหภูมิของการทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส จะให้แนวโน้มของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ > มีเทน > คาร์บอนมอนอกไซด์ > ไฮโดรเจน แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทอริแฟกชันจะส่งผลโดยตรงต่อสัดส่วนองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ นั่นคือให้สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลง ในขณะที่สัดส่วนการฟอร์มตัวของแก๊สมีเทน และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยที่ภาวะการทดลองเดียวกันเมื่อทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบด จะเห็นได้ว่าการทอริแฟกชันร่วมกับวัสดุเบดมีการฟอร์มตัวของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับการทอริแฟกชันโดยไม่ใช้วัสดุเบดร่วม โดยการฟอร์มตัวของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นั้นเกิดจากการ decarboxylation ของ acid group ในชีวมวล ซึ่งงานวิจัยจะเห็นว่ามีส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีการฟอร์มตัวของมีเทนที่ค่อนข้างสูงจนผิดสังเกตเมื่ออุณหภูมิของการทอริแฟกชันสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองนั้นมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีระบบควบคุมความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้ไม่เกิน 14-15 บาร์ เมื่ออุณหภูมิประมาณ 250 – 280 องศาเซลเซียส ผู้ทดลองได้สังเกตพบว่ามี ความดันเกินกำหนดและมีการปล่อยแก๊สบ้างส่วนผ่านทางวาล์วเพื่อควบคุมความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์จนเอาสู่ระดับปกติ ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงที่มีการเกิดฟอร์มตัวของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงอาจส่งผลต่อสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยลง และได้สัดส่วนมีเทนและไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นมากกว่าที่ควร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของอุณหภูมิและผลของวัสดุเบดที่มีต่อสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของแข็งที่ทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบดด้วยอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์เขย่า อัตราการแกว่ง 7.5 รอบต่อนาที

5.1.1 ผลของอุณหภูมิในการทอริแฟกชันชีวมวล

การเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวลทำให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งมีปริมาณสารระเหย องค์ประกอบธาตุออกซิเจน ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ลดลง ลดลง ส่วนค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

5.1.2 ผลของวัสดุเบดในการทอริแฟกชันชีวมวล

การทอริแฟกชันชีวมวลร่วมกับวัสดุเบดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของชีวมวลได้ดีกว่ากรณีทอริแฟกชันชีวมวลเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้วัสดุเบดร่วม

เมื่อทอริแฟกชันร่วมกับวัสดุเบดจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของสารระเหยและองค์ประกอบของธาตุออกซิเจนที่ลดลง ส่วนคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้น และให้สมบัติความเป็นเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงถ่านหินมากขึ้นเมื่อเทียบกับการทอริแฟกชันชีวมวลกรณีไม่มีวัสดุเบดร่วม

โดยภาวะที่เหมาะสมในการทอริแฟกชันในงานวิจัยนี้คือ

กรณีใช้ชีวมวลตัวอย่างเป็นขี้เลื่อย การทอริแฟกชันขี้เลื่อยร่วมกับวัสดุเบดซีโอไลต์ 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งมีร้อยละของปริมาณสารระเหย 18.33 โดยน้ำหนัก ร้อยละของคาร์บอนคงตัว 76.95 โดยน้ำหนัก ร้อยละขององค์ประกอบออกซิเจน 14.26 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ประมาณ 30.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมีสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุในผลิตภัณฑ์ของแข็งใกล้เคียงถ่านหินบิทูมินัสมากที่สุด

กรณีใช้ชีวมวลตัวอย่างเป็นไม้กระถินยักษ์ การทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์ร่วมกับวัสดุเบดซีโอดีต์ 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งมีร้อยละของปริมาณสารระเหย 18.11 โดยน้ำหนัก ร้อยละของคาร์บอนคงตัว 77.41 โดยน้ำหนัก ร้อยละขององค์ประกอบออกซิเจน 20.75 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ประมาณ 27.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากงานวิจัย พบว่าชนิดของชีวมวลมีผลต่อสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังผ่านการทอริแฟกชัน จึงควรมีการศึกษาการทอริแฟกชันจากชีวมวลชนิดอื่น เช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย และกะลาปาล์ม เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและลดปัญหาจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

5.2.2 ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบกะหากพัฒนาต่อเป็นระบบต่อเนื่องจะทำให้การประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมนั้นมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัญจนา บุญเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- เกริกชัย สุกาญจน์จที. ไอน้ำและพลังงานถ่านหิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
- นคร ทิพย์าวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2553.
- อนุพันธ์ พิมพ์ช่วย. การทดสอบสมรรถนะในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงของแกลบที่ผ่านกระบวนการทอรีฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2552.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.aoe.go.th [2552]
- พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กรม. รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย ปี 2552. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th> [2552]
- พลังงาน. กระทรวง. ค่าความร้อนของชีวมวล. แหล่งที่มา: <http://www.energy.go.th> [ออนไลน์]
- นัฐ วรยศ, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, นคร ทิพย์าวงศ์ และณัฐวุฒิ ดุษฎี. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าระดับชุมชนจากไม้โตไว. วารสารสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติด้านพลังงาน ฉบับพิเศษ (วช. ครบรอบ 50 ปี): 89 – 98.

ภาษาอังกฤษ

- Arias, B., Peviad, C., Feroso, J.,and Plaza, M.G. Influence of Torrefaction on The Grindability and Reactivity of Woody Biomass. Fuel Processing Technology. 89 (2007): 169-175.
- Bergman, P.C.A, Prins, M.J., Boersma, A.R., Ptasinski, K.J., Kiel, J.H.A., Janssen, F.J.J.G. Torrefaction for Entrained-Flow Gasification of Biomass., The World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Italy, 2004.
- Bergman, P.C.A.,and Kiel, J.H.A. Torrefaction for Biomass Upgrading., European Biomass Conference & Exhibition, France, 2005.
- Bridgeman, T.G., Jone, J.M., Shield, I.,and Williams, P.T. Torrefaction of Reed Canary Grass, Straw and Willow to Enhance Solid Fuel Qualities and Combustion Properties. Fuel. 87 (2008): 844 – 856.
- Demirbas, A. Calculation of Higher Heating Value of Biomass Fuels. Fuel. 76 (1997): 431 – 434.
- Di Blasi, C.,and Lanzetta, M. Intrinsic Kinetics of Isothermal Xylan Degradation in Inert Atmosphere. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 40-41 (1997): 287 - 303.
- Limmeechokchai, B.,and Suksuntornsiri, P. Assessment of Cleaner Electricity Generation Technology for Net CO₂ Mitigation in Thailand. Renewable and Sustainable Energy Review. 11 (2007): 315 – 330.
- Pach, M., Zanzi, R., and Bjornborn, E. Torrefied Biomass a Substitute for Wood and Charcoal., Asia Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Kuala Lumpur, 2002.
- Parikka, M. Global Biomass Fuel Resources. Biomass and Bioenergy. 27 (2004): 613 – 620.
- Prins, M.J., Ptasinski, K.J.,and Janssen, F.J.J.G. Torrefaction of Wood Part 2. Analysis of Product. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 77 (2006): 35 – 40.
- Yub Harun, N., Afzal, M.T.,and Azizan, M.T. TGA Analysis of Rubber Seed Kernel. International Journal of Engineering 3 (2009): 639 – 65

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของชีวมวล

1. การวิเคราะห์ของแข็งแบบประมาณ (Proximate Analysis: ASTM D 3173-D 3175)

1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างชีวมวล (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D 3173)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็ง มาให้ความร้อนในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยจากของแข็ง ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของของแข็งที่หายไป

เครื่องมือ

1. ตู้อบ
2. ถ้วยกระเบื้อง (Porcelain Crucible) พร้อมฝาปิด
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)

วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 15 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง
3. นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง (จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งคงที่) ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งที่อบแล้วพร้อมฝาปิด บันทึกผล

การคำนวณ

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

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็ง
เริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็ง
เริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

1.2 ปริมาณเถ้าในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal : ASTM D 3174)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้าคำนวณจากน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากเผา

เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ปิดฝา และเผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง (หรืออาจใช้ตัวอย่างของแข็งที่ผ่านการอบหาความชื้นแล้ว)

3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งพร้อมฝา เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องปิดฝา ค่อย ๆ ให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ทำให้อุณหภูมิของเตาเผาถึง 400-500 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส ฝาของแข็งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
4. นำถ้วยกระเบื้องและฝาลออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

การคำนวณ

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

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเถ้า
	W_3	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาและเถ้า (กรัม)
	W_4	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D 3175)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งที่หายไป

เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ครุชชีเบลทำจากนิเกิลพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. เผาครุชชีเบิลพร้อมฝานในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาน บันทึกผล
3. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยนิกเกิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิทบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำถ้วยนิกเกิลพร้อมตัวอย่างของแข็งเผาในเตาเผาแบบท่อ ให้ความร้อนแก่ของแข็งที่บริเวณด้านบนของเตาเผาแบบท่อ นาน 3 นาที และบริเวณกลางเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อีก 7 นาที ตามลำดับ
5. นำถ้วยนิกเกิลออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของถ้วยนิกเกิลพร้อมฝานและของแข็งที่เหลือ บันทึกผล

การคำนวณ

$$V = \left(\frac{W_5 - W_6}{W} \times 100 \right) - M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น
	W_5	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝานและน้ำหนักของของแข็งก่อนเผา (กรัม)
	W_6	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝานและน้ำหนักของของแข็งหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักตัวอย่างของแข็งเริ่มต้น (กรัม)

1.3 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างของแข็ง

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละเถ้า} - \text{ร้อยละสารระเหย}$$

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ยี่ห้อ Agilent 3000A เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (column) ที่บรรจุด้วยสารที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า stationary phase และมีแก๊สพา (carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (recorder)

แก๊สโครมาโตกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. แก๊สพา (Carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
4. คอลัมน์ (Column)
5. ดีเทคเตอร์ (Detector)
6. เครื่องบันทึก (Recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจายเร็ว มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

2. คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วน ๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

3. ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดได้ด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่าง ๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณมีช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง
- มีเสถียรภาพ (Stability) และความเที่ยง (Reproducibility)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ ทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาพร้อมกับแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์แล้ว ดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

ภาคผนวก ค

สูตรคำนวณ

1. คักดีของถ่านหิน

อัตราส่วนของเชื้อเพลิงเป็นอัตราที่แสดงถึงปริมาณที่เชื้อเพลิงจะเผาไหม้บนตะแกรงต่อปริมาณของเชื้อเพลิงที่จะเผาไหม้เหนือตะแกรง

$$\text{อัตราส่วนเชื้อเพลิง} = \frac{\text{คาร์บอนคงตัว (FC)}}{\text{สารระเหย (VM)}}$$

อัตราส่วนของเชื้อเพลิง (FC/VM) สามารถบอกถึงคักดีของถ่านหินได้โดยประมาณดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 แสดงคักดีของถ่านหิน

คักดีของถ่านหิน	อัตราส่วนของเชื้อเพลิง (FC/VM)
แอนทราไซต์ (Antracite)	10 - 6
เซมิแอนทราไซต์ (Semiantracite)	6 - 10
เซมิบิทูมินัส (Semibituminous)	3 - 7
บิทูมินัส (Bituminous)	½ - 3

สำหรับถ่านหินที่มีคักดีต่ำกว่าถ่านหินบิทูมินัส เช่นถ่านหินซับ-บิทูมินัส และลิกไนท์ จะมีอัตราส่วนของเชื้อเพลิงเช่นเดียวกับถ่านหินบิทูมินัส แต่ต้องใช้ปริมาณน้ำ หรือออกซิเจนที่มีช่วยจำแนกด้วย

2. การเปลี่ยนรูปฐานการรายงาน

การเปลี่ยนการรายงาน as-received basis มาเป็นฐาน moisture free หรือ dry basis ให้คุณรายงานวิเคราะห์ as-received ด้วย :

$$100/(100-M)$$

โดย M = เปอร์เซ็นต์ความชื้น

การเปลี่ยนการรายงานบนฐาน as-received มาเป็นฐาน ash and moisture free ให้
คุณแต่ละรายการในรายงานวิเคราะห์ as-received ด้วย :

$$100/(100-M-A)$$

โดย A = เปอร์เซ็นตึ้เถ้า

ตารางที่ ข.2 ยกตัวอย่างเปรียบเทียบการรายงานการวิเคราะห์ที่เลือกบนฐานต่างๆ

รายการ	หน่วย	as-received basis	dry basis	ash and moisture free basis
Moisture (M)	%	3.91	-	-
Volatile matter	%	76.65	79.77	80.64
Fixed carbon	%	18.4	19.15	19.36
Ash (A)	%	1.04	1.08	-
Total	%	100	100	100
Heating Value	KJ	19723.6	20526.17	20750.76

3. คำนวณสัดส่วนอะตอม O/C และ H/C

ยกตัวอย่าง กรณี ชี้เลือกที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น

จากตารางวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

คาร์บอนร้อยละ 56.59 โดยน้ำหนัก

ไฮโดรเจนร้อยละ 6.30 โดยน้ำหนัก

ออกซิเจนร้อยละ 37.30 โดยน้ำหนัก

ไนโตรเจนร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก

น้ำหนักวัตถุดิบที่ใช้ 10 กรัม

ปริมาณธาตุในชี้เลือกที่เป็นวัตถุดิบ

ปริมาณคาร์บอน $56.59 \times 10 = 5.659$ กรัม

ปริมาณไฮโดรเจน $6.30 \times 10 = 0.630$ กรัม

ปริมาณออกซิเจน $37.30 \times 10 = 3.730$ กรัม

เลขมวลอะตอมของ: คาร์บอน = 12; ไฮโดรเจน = 1; ออกซิเจน = 16

มวลอะตอมของธาตุ (เลขอะโวคาโด) 6.02×10^{23} อะตอม = 1 โมลอะตอม

เลขอะตอมคาร์บอน $(5.659/12) \times (6.02 \times 10^{23}) = 0.472 \times (6.02 \times 10^{23})$ อะตอม -----(1)

เลขอะตอมไฮโดรเจน $(0.630/1) \times (6.02 \times 10^{23}) = 0.630 \times (6.02 \times 10^{23})$ อะตอม -----(2)

เลขอะตอมออกซิเจน $(3.730/16) \cdot (6.02 \cdot 10^{23}) = 0.233 \cdot (6.02 \cdot 10^{23})$ อะตอม -----(3)

$$(3)/(1) : \text{สัดส่วนอะตอมออกซิเจน/คาร์บอน} = 0.233/0.472 \\ = 0.494$$

$$(2)/(1) : \text{สัดส่วนอะตอมไฮโดรเจน/คาร์บอน} = 0.630/0.472 \\ = 1.335$$

4. คำนวณร้อยละพลังงานที่ได้ (Energy Yield)

ยกตัวอย่าง กรณีการทอริแฟกชันซึ่งเกี่ยวข้องกับวัสดุเบดซีโพลิต 5A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

คำนวณ

จากตาราง การวิเคราะห์แบบประมาณ และเปลี่ยนเป็นฐาน ash and moisture free basis

รายการ	หน่วย	as-received basis
Moisture (M)	%	0.21
Volatile matter	%	18.33
Fixed carbon	%	76.95
Ash (A)	%	4.51
Total	%	100

เปลี่ยนการรายงานบนฐาน as-received มาเป็นฐาน ash and moisture free ให้คูณแต่ละรายการในรายงานวิเคราะห์ as-received ด้วย :

$$100/(100-M-A) = 100/(100-0.21-4.51) \\ = 1.0495$$

สูตร : หาร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ (ash and moisture free basis)

$$Y_{mass}(\%) = \left(\frac{m_{product}}{m_{feed}} \right)_{daf} \times 100$$

$$\text{น้ำหนักซีโพลิตตั้งต้น} = 10 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้} = 4.467 \text{ กรัม}$$

$$\text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้} = (4.467/10) \cdot 100$$

$$= 44.67 \%$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ (ash and moisture free basis)} &= 44.67 * 1.0495 \\ &= 46.88 \% \quad \text{-----(4)} \end{aligned}$$

สูตร : หาร้อยละพลังงานที่ได้ (ash and moisture free basis)

$$Y_{energy}(\%) = Y_{mass} \left(\frac{HHV_{product}}{HHV_{feed}} \right)_{daf}$$

$$\text{ค่าความร้อนของชี้เลี้ยงตั้งต้น (HHVproduct)} = 19723.64 \text{ KJ/Kg}$$

$$\text{ค่าความร้อนผลิตภัณฑ์ของแข็ง (HHVfeed)} = 30209.79 \text{ KJ/Kg}$$

ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์/วัตถุดิบ (ash and moisture free basis)

$$= (30209.79/19723.64) * 1.0495$$

$$= 1.607$$

----- (5)

$$\text{ร้อยละพลังงานที่ได้ (4)*(5)} = 46.88 * 1.607$$

$$= 75.34 \%$$

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลผลการทดลองร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ (as-received basis)

กรณี การทอริแพกชันโดยใช้ชีวมวลเป็นชี้เลี้ยง

วัสดุเบด	อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง (%)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
ไม่ใช้วัสดุเบด	200	77.89	71.5	74.70
	250	70.31	61.12	65.72
	300	68.89	58.05	63.47
ทราย	200	66.6	63.6	65.10
	250	60.65	58.1	59.38
	300	48.48	46.12	47.30
ซีโอไลต์ 3A	200	61.5	57.02	59.26
	250	53	49.73	51.37
	300	47.91	44.97	46.44
ซีโอไลต์ 5A	200	55.98	49.8	52.89
	250	50.49	45.58	48.04
	300	46.72	42.62	44.67

กรณี การทอริแฟกชันโดยใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์

วัสดุเบด	อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง (%)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
ไม่ใช้วัสดุเบด	200	73.81	66.45	70.13
	250	64.51	60.25	62.38
	300	58.12	51.13	54.62
ทราย	200	58.54	49.70	54.12
	250	49.70	42.42	46.06
	300	43.57	39.70	41.63
ซีโอไลต์ 3A	200	57.29	49.33	53.31
	250	47.60	44.51	46.05
	300	42.86	38.12	40.49
ซีโอไลต์ 5A	200	56.17	49.75	52.96
	250	47.54	43.52	45.53
	300	43.00	38.49	40.74

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลผลการทดลองวิเคราะห์แบบประมาณ (as-received basis)

กรณี การทอริแฟกชันโดยใช้ชีวมวลเป็นชี้เลี้ยง

วัสดุเบด	อุณหภูมิ (°C)	วิเคราะห์แบบประมาณ (%) : ชี้เลี้ยง			
		ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น		3.91	76.65	18.4	1.04
ไม่ใช่วัสดุเบด	200	1.21	56.92	40.22	1.79
	250	0.81	46.84	50.56	1.79
	300	0.76	35.4	61.97	1.87
ทราย	200	0.69	56.44	39.99	2.88
	250	0.43	34.79	61.52	3.26
	300	0.34	20.64	75.43	3.59
ซีโอไลต์ 3A	200	0.57	43.31	52.14	3.98
	250	0.28	36.32	59.14	4.26
	300	0.19	18.94	76.53	4.35
ซีโอไลต์ 5A	200	0.62	42.51	53.06	3.81
	250	0.27	33.77	61.94	4.02
	300	0.21	18.33	76.95	4.51

กรณี การทอริแฟกชันโดยใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์

วัสดุเบด	อุณหภูมิ (°C)	วิเคราะห์แบบประมาณ (%) : ไม้กระถินยักษ์			
		ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น					
ไม่ใช้วัสดุเบด	200	2.13	47.15	48.75	1.97
	250	1.63	30.59	65.62	2.16
	300	1.61	27.99	68.27	2.13
ทราย	200	1.01	45.44	50.38	3.17
	250	0.82	27.99	67.98	3.21
	300	0.56	20.18	75.78	3.48
ซีโอไลท์ 3A	200	0.85	43.31	52.05	3.79
	250	0.38	26.24	69.23	4.15
	300	0.25	18.28	77.13	4.34
ซีโอไลท์ 5A	200	0.72	41.51	53.06	3.71
	250	0.42	24.85	70.72	3.96
	300	0.25	18.11	77.41	4.48

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลผลการทดลองวิเคราะห์แบบแยกธาตุวิเคราะห์ด้วย CHN Analyzer
(as-received basis)

กรณี การทอริแฟกชันโดยใช้ชีวมวลเป็นชี้เลี้ยง

วัสดุเบด	อุณหภูมิ (°C)	วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (%) : ชี้เลี้ยง			
		C	H	O	N
ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น		56.59	6.3	37.03	0.08
ไม่ใช่วัสดุเบด	200	58.28	4.73	36.64	0.35
	250	62.51	3.83	33.17	0.49
	300	68.07	4.32	27.18	0.43
ทราย	200	62.9	4.18	32.49	0.43
	250	65.89	3.49	30.19	0.43
	300	74.04	2.59	22.8	0.57
ซีโอไลต์ 3A	200	64.1	4.57	30.97	0.36
	250	70.68	4.15	24.74	0.43
	300	76.91	3.64	18.96	0.5
ซีโอไลต์ 5A	200	65.03	4.51	30.12	0.34
	250	71.68	4.16	23.77	0.39
	300	78.35	2.81	18.31	0.53

กรณี การทอริแฟกชันโดยใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์

วัสดุเบด	อุณหภูมิ (°C)	วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (%) : ไม้กระถินยักษ์			
		C	H	O	N
ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น		49.99	6.19	43.02	0.08
ไม้ใช้วัสดุเบด	200	55.09	4.46	38.88	1.57
	250	57.83	3.76	36.65	1.76
	300	61.33	3.43	33.4	1.84
ทราย	200	59.37	3.7	35.2	1.73
	250	62.9	3.6	31.74	1.76
	300	66.92	3.49	27.81	1.78
ซีโอไลท์ 3A	200	61.27	4.14	33.12	1.47
	250	65.95	3.33	29.2	1.52
	300	70.02	3.07	25.33	1.58
ซีโอไลท์ 5A	200	62.74	3.47	32.31	1.48
	250	67.13	3.74	27.71	1.42
	300	70.26	3.89	24.5	1.35

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลผลการทดลองของค่าความร้อนวิเคราะห์ด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (dry basis)

กรณี การทอริแฟกชันโดยใช้ชีวมวลเป็นชี้เลี้ยง

วัสดุเบด	อุณหภูมิ (°C)	ค่าความร้อน (KJ/Kg) : ชี้เลี้ยง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น		19431.27	20016.00	19723.64
ไม่ใช้วัสดุเบด	200	24408.21	24771.33	24589.77
	250	26668.61	27518.45	27093.53
	300	26987.40	27554.80	27271.10
ทราย	200	26106.25	25914.95	26010.60
	250	28036.57	28284.30	28160.44
	300	29734.78	29257.86	29496.32
ซีโอไลต์ 3A	200	26982.80	26239.51	26611.15
	250	28449.14	29293.70	28871.42
	300	30119.50	29800.30	29959.90
ซีโอไลต์ 5A	200	27335.66	26432.57	26884.11
	250	29230.14	28603.05	28916.59
	300	30197.04	30222.54	30209.79

กรณี การทอริแฟกชันโดยใช้ชีวมวลเป็นไม้กระถินยักษ์

วัสดุเบด	อุณหภูมิ (°C)	ค่าความร้อน (KJ/Kg) : ไม้กระถินยักษ์		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น		16700.15	17284.68	16992.41
ไม่ใช้วัสดุเบด	200	19885.39	20440.66	20163.02
	250	21536.32	21947.72	21742.02
	300	24643.19	25008.19	24825.69
ทราย	200	20693.84	21076.98	20885.41
	250	22948.28	23492.56	23220.42
	300	26127.09	26754.30	26440.69
ซีโอไลท์ 3A	200	21403.10	21646.46	21524.78
	250	23305.80	23409.55	23357.67
	300	26672.71	26985.49	26829.10
ซีโอไลท์ 5A	200	21655.95	22237.68	21946.82
	250	23492.52	23704.57	23598.55
	300	26755.22	26963.26	26859.24

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลผลการทดลองของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดของการทอริแฟกชันซีเลียม

กรณี ทอริแฟกชันซีเลียมโดยไม่ใช้วัสดุเบดร่วม

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแก๊ส	แก๊สมาตรฐาน (Area)		แก๊สผลิตภัณฑ์ (Area)		%			ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ (%) normalize gas composition
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
200	H ₂	39725.8	41387.0	10300.5	10979.9	0.26	0.27	0.26	0.59
	CO	1876.0	2146.2	38026.7	37390.5	20.27	17.42	18.85	42.09
	CH ₄	7910.4	7950.6	24189.7	26176.8	3.06	3.29	3.18	7.09
	CO ₂	3100.5	3365.7	71056.2	74265.0	22.92	22.07	22.49	50.23
250	H ₂	39725.8	41387.0	30191.6	31040.3	0.76	0.75	0.76	1.50
	CO	1876.0	2146.2	30334.9	37837.5	16.17	17.63	16.90	33.57
	CH ₄	7910.4	7950.6	55594.4	59882.42	7.03	7.53	7.28	14.46
	CO ₂	3100.5	3365.7	76883.2	87613.7	24.80	26.03	25.41	50.48
300	H ₂	39725.8	41387	59358.3	66045.4	1.49	1.60	1.55	3.09
	CO	1876	2146.2	25830.5	21076.5	13.77	9.82	11.79	23.61
	CH ₄	7910.4	7950.6	134882.1	142264.3	17.05	17.89	17.47	34.97
	CO ₂	3100.5	3365.7	56491.1	67591.7	18.22	20.08	19.15	38.33

กรณี ทอริแฟกชันที่เชื่อมร่วมกับวัสดุเบดทราย

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแก๊ส	แก๊สมาตรฐาน (Area)		แก๊สผลิตภัณฑ์ (Area)		%			ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ (%) normalize gas composition
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
200	H ₂	32201.6	37689.3	38062.3	43716.3	1.18	1.16	1.17	2.44
	CO	1752.4	1885.9	35624.7	34182	20.33	18.13	19.23	40.04
	CH ₄	7303.1	7270.3	10735.6	11139.9	1.47	1.53	1.50	3.13
	CO ₂	3100.3	3311.1	79429.7	88141.5	25.62	26.62	26.12	54.39
250	H ₂	32201.6	37689.3	65956.3	60952.6	2.05	1.62	1.83	2.73
	CO	1752.4	1885.9	42495.7	47056.7	24.25	24.95	24.60	36.69
	CH ₄	7303.1	7270.3	59301.2	64615.1	8.12	8.89	8.50	12.68
	CO ₂	3100.3	3311.1	103736.0	101861.8	33.46	30.76	32.11	47.89
300	H ₂	36035.4	38025.6	206122.5	231728	5.72	6.09	5.91	7.92
	CO	1805.2	1906.2	35550.6	39050.09	19.69	20.49	20.09	26.93
	CH ₄	7604.7	7264.9	91864.8	84083.9	12.08	11.57	11.83	15.85
	CO ₂	2428.0	2311.6	93478.0	81077.1	38.50	35.07	36.79	49.31

กรณี ทอริแฟกชันที่เชื่อมร่วมกับวัสดุเบดซีโพลต์ 3A

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแก๊ส	แก๊สมาตรฐาน (Area)		แก๊สผลิตภัณฑ์ (Area)		%			ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ (%) normalize gas composition
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
200	H ₂	36035.4	38025.6	40458.1	39638.9	1.12	1.04	1.08	1.93
	CO	1805.2	1906.2	39157.3	37999.5	21.69	19.93	20.81	37.02
	CH ₄	7604.7	7264.9	34221.2	37876.9	4.50	5.21	4.86	8.64
	CO ₂	2428.0	2311.6	69198.0	70375.1	28.50	30.44	29.47	52.42
250	H ₂	34077.7	35976.5	215098.7	218737.1	6.31	6.08	6.20	10.08
	CO	1725.2	1843.4	22893.4	29818.1	13.27	16.18	14.72	23.96
	CH ₄	8040.4	7580.6	92627.4	83917.2	11.52	11.07	11.30	18.38
	CO ₂	2892.9	2714.3	82447.6	81353.4	28.50	29.97	29.24	47.58
300	H ₂	34077.7	35976.5	550991.9	532811.9	16.17	14.81	15.49	23.87
	CO	1725.2	1843.4	11627.8	13509.1	6.74	7.33	7.03	10.84
	CH ₄	8040.4	7580.6	147300.1	167497.7	18.32	22.10	20.21	31.14
	CO ₂	2892.9	2714.3	63990.9	60223.2	22.12	22.19	22.15	34.14

กรณี ทอริแฟกชันที่เชื่อมร่วมกับวัสดุเบดซีโพลต์ 5A

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแก๊ส	แก๊สมาตรฐาน (Area)		แก๊สผลิตภัณฑ์ (Area)		%			ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ (%) normalize gas composition
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
200	H ₂	37044.3	41863.7	117356.3	126009.7	3.17	3.01	3.09	4.43
	CO	1802.6	2181.2	33961.0	42838.8	18.84	19.64	19.24	27.57
	CH ₄	7782.6	7500.8	82184.3	87684.3	10.56	11.69	11.12	15.94
	CO ₂	3390.7	2982.5	125625.4	106266.5	37.05	35.63	36.34	52.07
250	H ₂	37044.3	41863.7	197075.7	211411.7	5.32	5.05	5.19	8.21
	CO	1802.6	2181.2	33041.7	42974	18.33	19.70	19.02	30.11
	CH ₄	7782.6	7500.8	64813.5	71857.7	8.33	9.58	8.95	14.18
	CO ₂	3390.7	2982.5	95414.3	95016.5	28.14	31.86	30.00	47.50
300	H ₂	40901.8	37502.8	573034.2	446433.3	14.01	11.90	12.96	20.99
	CO	1822.2	2111.8	19770.9	17878.5	10.85	8.47	9.66	15.65
	CH ₄	7792.9	7412.3	121226.4	120524	15.56	16.26	15.91	25.77
	CO ₂	2874.6	3503.6	72181.2	74598.7	25.11	21.29	23.20	37.59

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลผลการทดลองของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดของการทอริแฟกชันไม้กระถินยักษ์

กรณี ทอริแฟกชันที่เลือกโดยไม่วัดดูเบคร่วม

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแก๊ส	แก๊สมาตรฐาน (Area)		แก๊สผลิตภัณฑ์ (Area)		%			ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ (%) normalize gas composition
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
200	H ₂	40901.8	37502.8	8589.4	10651.9	0.21	0.28	0.25	0.40
	CO	1822.2	2111.8	37081.8	38583.0	20.35	18.27	19.31	31.28
	CH ₄	7792.9	7412.3	10052.8	12001.9	1.29	1.62	1.45	2.36
	CO ₂	2874.6	3503.6	123722.8	134555.3	43.04	38.40	40.72	65.96
250	H ₂	40901.8	37502.8	86711.8	121291	2.12	3.23	2.68	3.44
	CO	1822.2	2111.8	32908.9	37239.8	18.06	17.63	17.85	22.94
	CH ₄	7792.9	7412.3	79643.4	92913.3	10.22	12.54	11.38	14.62
	CO ₂	2874.6	3503.6	137233.4	154444.6	47.74	44.08	45.91	59.00
300	H ₂	40102.3	34412.3	351296.1	335293.2	8.76	9.74	9.25	11.47
	CO	2004.5	1846.9	20606.3	23866.3	10.28	12.92	11.60	14.38
	CH ₄	7994.1	8027.5	135979.6	135942.9	17.01	16.93	16.97	21.04
	CO ₂	3035.6	2665.2	124632.6	118921.2	41.06	44.62	42.84	53.11

กรณี ทอริแฟกชันที่เชื่อมร่วมกับวัสดุเบดทราย

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแก๊ส	แก๊สมาตรฐาน (Area)		แก๊สผลิตภัณฑ์ (Area)		%			ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ (%) normalize gas composition
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
200	H ₂	40102.3	34412.3	30878.8	20667.8	0.77	0.60	0.69	1.43
	CO	2004.5	1846.9	22229.9	26255.7	11.09	14.22	12.65	26.37
	CH ₄	7994.1	8027.5	48284.4	47762.2	6.04	5.95	5.99	12.49
	CO ₂	3035.6	2665.2	81839.8	80898.1	26.96	30.35	28.66	59.71
250	H ₂	40102.3	34412.3	194496.2	180939.5	4.85	5.26	5.05	7.54
	CO	2004.5	1846.9	28083.1	26227.7	14.01	14.20	14.11	21.04
	CH ₄	7994.1	8027.5	97847.8	110899.8	12.24	13.81	13.03	19.43
	CO ₂	3035.6	2665.2	98110.6	99630.7	32.32	37.38	34.85	51.99
300	H ₂	38749.3	36752.5	476616.4	606804.8	12.30	16.51	14.41	19.29
	CO	1790.2	2040.0	20766.3	15443.5	11.60	7.57	9.59	12.84
	CH ₄	7780.4	7436.8	92586.8	123128.7	11.90	16.56	14.23	19.06
	CO ₂	2856.1	3026.7	111673.5	102261.7	39.10	33.79	36.44	48.81

กรณี ทอริแฟกชันที่เชื่อมร่วมกับวัสดุเบดซีโพลต์ 3A

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแก๊ส	แก๊สมาตรฐาน (Area)		แก๊สผลิตภัณฑ์ (Area)		%			ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ (%) normalize gas composition
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
200	H ₂	38749.3	36752.5	75173.6	111601.5	1.94	3.04	2.49	4.43
	CO	1790.2	2040.0	34228.6	32386.9	19.12	15.88	17.50	31.13
	CH ₄	7780.4	7436.8	39757.8	43524.7	5.11	5.85	5.48	9.75
	CO ₂	2856.1	3026.7	95964.9	84382.1	33.60	27.88	30.74	54.69
250	H ₂	38749.3	36752.5	229395.9	265415.4	5.92	7.22	6.57	10.69
	CO	1790.2	2040.0	27103.6	19002.2	15.14	9.31	12.23	19.90
	CH ₄	7780.4	7436.8	77648.4	95598.7	9.98	12.85	11.42	18.58
	CO ₂	2856.1	3026.7	84454.9	99574.9	29.57	32.90	31.23	50.83
300	H ₂	38200.9	37560.3	522216.3	623701.6	13.67	16.61	15.14	23.33
	CO	1810.8	1870.4	9162.6	14689	5.06	7.85	6.46	9.95
	CH ₄	7583.5	7931.6	165092.8	157492.4	21.77	19.86	20.81	32.08
	CO ₂	2701.1	2827.4	64934.4	59134.8	24.04	20.91	22.48	34.64

กรณี ทอริแฟกชันที่เชื่อมร่วมกับวัสดุเบดซีโพลต์ 5A

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแก๊ส	แก๊สมาตรฐาน (Area)		แก๊สผลิตภัณฑ์ (Area)		%			ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ (%) normalize gas composition
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
200	H ₂	38200.9	37560.3	165027.9	127570.7	4.32	3.40	3.86	5.53
	CO	1810.8	1870.4	33572.2	28241.7	18.54	15.10	16.82	24.10
	CH ₄	7583.5	7931.6	84101.0	95560.8	11.09	12.05	11.57	16.58
	CO ₂	2701.1	2827.4	103830.3	103636.0	38.44	36.65	37.55	53.80
250	H ₂	38115.6	36863.9	133785.8	190302.8	3.51	5.16	4.34	6.87
	CO	1820	1727.4	23259.6	24277.1	12.78	14.05	13.42	21.24
	CH ₄	7854.2	7979.1	95114.4	73937.3	12.11	9.27	10.69	16.92
	CO ₂	3037.8	2729.7	102234.6	97644.1	33.65	35.77	34.71	54.96
300	H ₂	38115.6	36863.9	349138.9	400507.8	9.16	10.86	10.01	16.22
	CO	1820	1727.4	11557.0	9835.1	6.35	5.69	6.02	9.76
	CH ₄	7854.2	7979.1	159283.2	127558.3	20.28	15.99	18.13	29.38
	CO ₂	3037.8	2729.7	78567.5	79852.9	25.86	29.25	27.56	44.65

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุดาวลัยย์ ดำหนก เกิดวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปี
การศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2550