

การทำไม้กระถินยักษ์ให้เป็นของเหลวโดยใช้น้ำมันเตาและ/หรือน้ำเป็นตัวทำละลาย



นายวัชร ดาบเงิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIQUEFACTION OF GIANT LEUCAENA USING FUEL OIL AND/OR WATER AS SOLVENTS

Mr. Watchara Dabngern



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำไม้กระถินยักษ์ให้เป็นของเหลวโดยใช้น้ำมันเตา และ/หรือน้ำเป็นตัวทำละลาย
โดย	นายวัชร ดาบเงิน
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. กัญญ์ กังวานสายชล)

วัชระ ดาบเงิน : การทำไม้กระถินยักษ์ให้เป็นของเหลวโดยใช้น้ำมันเตาและ/หรือน้ำเป็นตัวทำละลาย (LIQUEFACTION OF GIANT LEUCAENA USING FUEL OIL AND/OR WATER AS SOLVENTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, 92 หน้า.

งานนี้สนใจลิกวิแพกชั้นของไม้กระถินยักษ์สำหรับผลิตเชื้อเพลิงเหลวหรือผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยการใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละของน้ำมันชีวภาพและคุณสมบัติของน้ำมันและศึกษาภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตน้ำมันชีวภาพ. ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ผลของอุณหภูมิ (300 และ 350 องศาเซลเซียส) ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (30 60 และ 90 นาที) ปริมาณตัวทำละลายน้ำมันเตา (0, 16.7, 33.3, 50 และ 100) และความเร็วในการกวน (200 300 และ 400 รอบต่อนาที) ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้รับ(น้ำมันชีวภาพร่วมกับน้ำมันเตา) ถูกวิเคราะห์ด้วย CHN และ GC-MS ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพคำนวณได้จากการหักลบส่วนของน้ำมันเตาเริ่มต้นออกจากของเหลวที่ได้ ผลการทดลองพบว่ากรณีที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเดียวที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส (12.07 wt.%) ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่สูงกว่าอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (6.40 wt.%) ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาจาก 30 เป็น 60 นาที แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็น 90 นาที ส่วนของผลความเร็วในการกวนพบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการกวนจาก 200 เป็น 400 รอบต่อนาทีในส่วนของตัวทำละลายผสมพบว่า ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีค่าสูงสุดร้อยละ 20.70 โดยน้ำหนักที่ปริมาณน้ำมันเตาร้อยละ 50 บ่งชี้ถึงอันตรายที่เกิดขึ้นในการใช้ตัวทำละลายผสม อาจเนื่องจากเกิดการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากตัวทำละลายผสมให้ค่าความร้อนประมาณ 36- 40 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์น้ำมันได้แก่ สารประกอบแอลิฟาติก แอโรแมติกและแอลกอฮอล์

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5572108923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: BIO-OIL / LIQUEFACTION / CO-SOLVENT /BIOMASS / GIANT LEUCAENA

WATCHARA DABNGERN: LIQUEFACTION OF GIANT LEUCAENA USING FUEL OIL AND/OR WATER AS SOLVENTS. ADVISOR: ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 92 pp.

This research focused on studying the liquefaction of Giant leucaena wood for producing liquid fuel or oil product using fuel oil and/or water as solvents. Experiments were conducted in a 500-ml autoclave reactor with an initial N<sub>2</sub> pressure of 10 bar. The influences of temperatures (300 and 350 °C), retention times (30, 60, 90 minutes), fuel oil content in mixed solvent (0, 16.7, 33.3, 50 and 100 wt.%) and stirrer speed (200, 300 and 400 rpm) were investigate. The obtained oil product (bio-oil/ fuel oil mixture) was analyzed by CHN analyzer and gas chromatography with mass spectrometry. The %bio-oil yield was calculated by deducting initial amount fuel oil from total weight of liquid product. Using pure fuel oil at a higher temperature of 350 °C gave higher bio-oil yield (12.07 wt.%) than that at a temperature of 300 °C (6.40 wt.%). Bio-oil yield increased with increasing retention time from 30 to 60 minutes but decreased when the time is too long, i.e. 90 minutes. In case of stirrer speed, the bio-oil yield increased with increasing stirrer speed from 200 to 400 rpm. In case of mixed solvent, the bio-oil yield increased with fuel oil content and reached the maximum value of 20.70 wt.% at the fuel oil content in solvent of 50%. This indicated a synergetic effect that would be attributable to the inhibition of secondary reaction in the co-solvent system. The oil product obtained from using mixed solvent had high heating value of about 36-40 MJ/kg and contained mostly aliphatic, aromatic, and alcohol compounds.

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

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

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยเรื่อง “การทำไม้กระถินยักษ์ให้เป็นของเหลวโดยใช้น้ำมันเตาและ/หรือน้ำเป็นตัวทำละลาย” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์ชาติ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.กันย์ กังวานสายชล กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2 ชีวมวล.....	6
2.2.1 แหล่งกำเนิดชีวมวล.....	7
2.2.2 ข้อแตกต่างระหว่างชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิล.....	8
2.2.3 ประโยชน์ของชีวมวล.....	9
2.2.4 ศักยภาพของพลังงานชีวมวล.....	10
2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล.....	12
2.3.1 เซลลูโลส.....	12
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส.....	13

2.3.3	ลิกนิน .....	13
2.3.4	ค่าความร้อน.....	16
2.3.5	การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ.....	17
2.4	แนวทางการใช้ชีวมวลในประเทศไทย .....	18
2.4.1	กระถินยักษ์ .....	19
2.5	กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง.....	20
2.5.1	กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion process) .....	21
2.6	น้ำมันเตา (Fuel oil).....	26
2.6.1	ประเภทของน้ำมันเตา.....	27
2.6.2	คุณสมบัติของน้ำมันเตา.....	28
2.6.3	ลักษณะการใช้งานของน้ำมันเตา .....	31
2.7	น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) .....	31
2.7.1	ปริมาณออกซิเจน .....	32
2.7.2	ปริมาณน้ำ.....	33
2.7.3	ความหนืดและอายุการใช้งาน.....	33
2.7.4	การกัดกร่อน .....	33
2.8	การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ .....	33
2.8.1	กระบวนการขจัดสารประกอบออกซิเจนในการผลิตน้ำมันชีวภาพ .....	34
2.8.2	โลหะแอลคาไล และแอลคาไลน์เอิร์ทในไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส.....	36
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	39
3.1	สารตั้งต้นและสารเคมี.....	39



3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	39
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมกระถินยักษ์ .....	39
3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง (Parr reactor).....	39
3.2.3 แบบจำลองอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง .....	40
3.2.4 อุปกรณ์การกรอง.....	41
3.2.5 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการแยก .....	41
3.2.6 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer).....	42
3.2.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography).....	43
3.2.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-Mass spectrometry).....	44
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	45
3.3.1 การเตรียมกระถินยักษ์.....	45
3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล .....	45
3.3.3 กระบวนการลิกวิแฟกชัน .....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....	49
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้กระถินยักษ์และน้ำมันเตา.....	50
4.2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล .....	53
4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลิกวิแฟกชัน .....	54
4.4 ผลของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำที่มีต่อลิกวิแฟกชัน .....	56
4.5 ผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อลิกวิแฟกชัน.....	61
4.6 ผลของอัตราส่วนระหว่างชีวมวลต่อตัวทำละลายที่มีต่อกระบวนการลิกวิแฟกชัน .....	64
4.7 ผลของความเร็วในการกวนที่มีต่อกระบวนการลิกวิแฟกชัน.....	66
4.8 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS).....	68

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	71
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	71
5.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลิกวิแฟกชัน .....	71
5.1.2 ผลของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำที่มีต่อลิกวิแฟกชัน.....	71
5.1.3 ผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อลิกวิแฟกชัน .....	71
5.1.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างชีวมวลต่อตัวทำละลายที่มีต่อกระบวนการลิกวิแฟกชัน .....	72
5.1.5 ผลของความเร็วในการกวนที่มีต่อกระบวนการลิกวิแฟกชัน .....	72
5.1.6 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	73
รายการอ้างอิง .....	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	92

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างชีวมวลกับเชื้อเพลิงฟอสซิล.....	9
ตารางที่ 2.2 การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....	11
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของชีวมวล.....	16
ตารางที่ 2.4 ประเภทและคุณสมบัติของน้ำมันเตาชนิดต่างๆ.....	30
ตารางที่ 2.5 สมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้และน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก.....	32
ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography).....	44
ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry).....	45
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไม้กระถินยักษ์.....	50
ตารางที่ 4.2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล.....	51
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Compositions) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันเตาเกรด A .....	52
ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของ ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	55
ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	56
ตารางที่ 4.6 ผลของตัวทำละลายผสมต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อน ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	59
ตารางที่ 4.7 สารประกอบในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ไม่ได้เติมชีวมวลจากการ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS.....	60
ตารางที่ 4.8 ผลของตัวทำละลายผสมต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	61
ตารางที่ 4.9 ผลของระยะเวลาต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อน ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	62
ตารางที่ 4.10 ผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	63

ตารางที่ 4.11 ผลของอัตราส่วนชีวมวลต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อน ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	65
ตารางที่ 4.12 ผลของความเร็วในการกวนต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อน ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	67
ตารางที่ 4.13 สารประกอบในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากการ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS.....	69
ตาราง ค.1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard).....	88
ตาราง ค.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด.....	88
ตารางที่ จ.1 ข้อมูลภาวะในการทดลอง.....	90
ตารางที่ จ.2 ข้อมูลผลการทดลอง .....	92



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วัฏจักรของชีวมวล .....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส .....	12
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส .....	13
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน .....	14
รูปที่ 2.5 มอนอเมอร์ลิกนินและลักษณะการเชื่อมขวางบางลวดลาย .....	15
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของชีวมวล (Biomass composition) .....	17
รูปที่ 2.7 แปลงปลูกต้นกระถินยักษ์ .....	19
รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตและการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล .....	20
รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่ภาวะความดันและอุณหภูมิสูง .....	24
รูปที่ 2.10 แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิสเบื้องต้น .....	24
รูปที่ 2.11 แสดงผลิตภัณฑ์น้ำมันเตาที่ได้จากหอกลิ้น .....	26
รูปที่ 2.12 ผลิตภัณฑ์น้ำมันเตา .....	27
รูปที่ 2.13 กระบวนการของปฏิกิริยา Deoxygenation ของ Guaiacol .....	35
รูปที่ 2.14 แนวทางการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบแอลคาไลนในกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิสเซลลูโลส.....	36
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง (Parr reactor) .....	40
รูปที่ 3.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง .....	41
รูปที่ 3.3 การแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำและน้ำมัน โดยใช้เทคนิคสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย .....	42
รูปที่ 3.4 ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแยก.....	42
รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer) .....	43
รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) .....	43
รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) .....	44
รูปที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการทดลอง .....	48

รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA .....	53
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชัน .....	54
รูปที่ 4.3 ผลของตัวทำละลายผสมต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชัน .....	57
รูปที่ 4.4 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชัน .....	61
รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลายต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน .....	64
รูปที่ 4.6 ผลของความเร็วในการกวนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน .....	66
รูปที่ 4.7 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากกระบวนการลิกวิแฟกชัน .....	68
รูปที่ ข. 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี .....	86



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการใช้พลังงานจากฟอสซิลมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ก่อให้เกิดปัญหามลพิษและสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการปลดปล่อยแก๊ส จึงมีการคิดค้นเพื่อหาพลังงานทดแทนและช่วยแก้ปัญหาหมลพิษ อย่างเช่น แหล่งพลังงานจากชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลถือเป็นแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมต่อประเทศเกษตรกรรมอย่างประเทศไทย เพราะมีชีวมวลทางการเกษตรเหลือใช้อยู่เป็นจำนวนมาก ชีวมวลที่นิยมใช้ศึกษานั้นมีอยู่หลายชนิด เช่น สาหร่าย ไม้ยูคาลิปตัส ฟางข้าว ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไม้กระถินยักษ์ (Giant leucaena) ซึ่งเป็นหนึ่งในพืชที่ถูกสนับสนุนให้เป็นพืชพลังงาน เนื่องจากเป็นไม้โตเร็ว สามารถปลูกเพื่อใช้เป็นพืชพลังงานเพื่อเพิ่มรายได้แก่เกษตรกรได้ กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลโดยอาศัยกระบวนการทางความร้อนเพื่อผลิตเป็นสารเชื้อเพลิง สามารถทำได้โดยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ แกซิฟิเคชัน (Gasification) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) และลิกวิแฟกชัน (Liquefaction) โดยทั้ง 3 กระบวนการมีลักษณะคล้ายกัน คือ การที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวลเพื่อให้พันธะของสารโมเลกุลขนาดใหญ่ภายในชีวมวลเกิดการแตกตัวสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง กระบวนการไพโรไลซิสให้น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก แต่ยังมีร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ต่ำ ส่วนกระบวนการลิกวิแฟกชันอาศัยการสลายตัวทางความร้อนและใช้ตัวทำละลายร่วม ไฮโดรเทอร์มอล ลิกวิแฟกชัน (Hydrothermal liquefaction) เป็นการใช้ชีวมวลร่วมกับน้ำทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแตกโมเลกุลของชีวมวลให้มีขนาดเล็ก และโซลโวไลซิส ลิกวิแฟกชัน (Solvolysis liquefaction) เป็นการใช้สารละลายเป็นตัวกลาง ข้อดีของวิธีนี้คือ ป้องกันการเกิดรีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Repolymerization) คือการรวมตัวกันของโมเลกุลเล็กๆ กลายเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการผลิตน้ำมันชีวภาพโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย พบว่าการใช้น้ำจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นของแข็งปริมาณมาก จึงมีการนำเอาตัวทำละลาย เช่น แอซีโตน โทลูอีน และแอลกอฮอล์โมเลกุลเล็ก มาใช้แทนน้ำ พบว่าตัวทำละลายดังกล่าว สามารถลดปัญหาการเกิดของแข็งเจือปนได้ ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้น แต่คุณภาพของน้ำมันยังคงไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ตัวทำละลายดังกล่าวจะถูกสลายตัวไประหว่าง

ปฏิกิริยา และไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อพัฒนาคุณภาพของน้ำมันชีวภาพให้ดีขึ้น และให้ตัวทำละลายสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์ด้วยกระบวนการลิกวิแฟกชันโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตา (Fuel oil) และน้ำ ซึ่งน้ำมันเตาเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ ที่คาดว่าจะมีเสถียรภาพสูงระหว่างกระบวนการและสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่หลังกระบวนการ รวมทั้งศึกษาผลของปัจจัยดำเนินการ ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความเร็วรอบสกรู อัตราส่วนของชีวมวลต่อตัวทำละลาย และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ ต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.1.1 ศึกษาผลของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำต่อปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากลิกวิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์

1.1.2 ศึกษาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมต่อปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากลิกวิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการผลิตน้ำมันชีวภาพจากลิกวิแฟกชันโดยใช้ น้ำมันเตาเป็นตัวทำละลาย

1.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชีวมวลด้วยการวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุ

1.3.3 ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเทคนิค Thermogravimetric/Differential thermal analyzer (TGA/DTA)

1.3.4 ทำการทดลองเพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยการศึกษาผลของตัวแปรต่อร้อยละผลได้ และคุณภาพของน้ำมัน ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการให้ความร้อน อัตราส่วนของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ

1.3.5 วิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ ค่าความร้อน องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (คาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และออกซิเจน) ปริมาณน้ำ ค่าความเป็นกรด และองค์ประกอบของสารประกอบในน้ำมันชีวภาพที่ได้



## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.1.3 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการลิกวิแฟกชัน โดยชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือไม้กระถินยักษ์

1.1.4 เตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

1.1.4.1 เตรียมไม้กระถินยักษ์โดยนำไปผ่านการบดละเอียดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตรและนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพทุกครั้ง

1.1.4.2 ตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำมันเตา และน้ำ และตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดน้ำมันได้แก่ ไดคลอโรมีเทนและเอซิโตน

1.1.5 ศึกษาการใช้เครื่องปฏิกรณ์สำหรับทำการวิจัย

1.1.6 วิเคราะห์สมบัติของไม้กระถินยักษ์

1.1.6.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชีวมวล

- การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า
- การวิเคราะห์แยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนด้วยเครื่อง CHN elemental analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN-2000

1.1.6.2 วิเคราะห์ค่าความร้อน(Heating value) ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ยี่ห้อ Parr calorimeter รุ่น 6200

1.1.6.3 ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเครื่อง Thermo gravimetric/Differential thermal analyzer (TG/DTA) ยี่ห้อ Metter Toledo รุ่น 851e โดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

1.1.7 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อการทำลิกวิแฟกชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์ ได้แก่

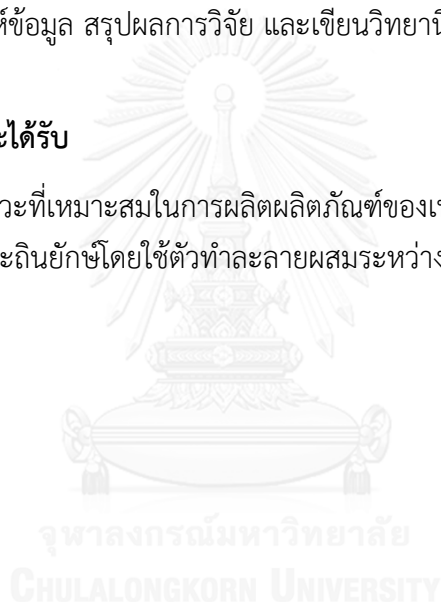
- อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส): 300-350
- ปริมาณของชีวมวล (กรัม): 10 15
- ชนิดของตัวทำละลาย : น้ำมันเตา น้ำ และตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ
- อัตราส่วนของน้ำมันเตาและน้ำ(กรัม): 0:90 45:45 60:30 75:15 และ 90:0

1.1.8 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์ในตัวทำละลายผสม

- ร้อยละผลได้ (Yield)
  - ค่าความร้อน (Heating value) ของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง Bomb calorimeter
  - ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง CHN elemental analyzer
  - องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี (GC/MS)
  - ปริมาณน้ำด้วยเครื่อง Karl Fischer
  - ปริมาณค่าความเป็นกรดด้วยเครื่อง Total acid number (TAN)
- 1.1.9 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพที่มีคุณภาพดี จากลิกวิแพกชั้นของไม้กระถินยักษ์โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

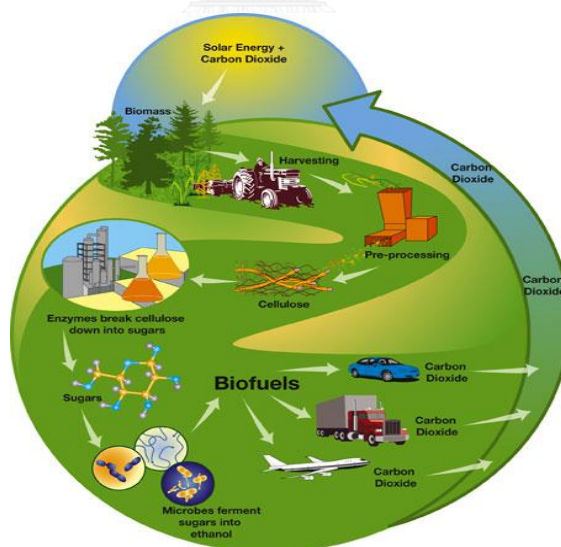
จากวิกฤตการณ์ราคาน้ำมัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้บริโภคที่เกี่ยวข้อง เป็นที่คาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2583 (Teerayutt 2009) ราคาน้ำมันจะถีบตัวสูงขึ้นจนผู้บริโภคไม่มีกำลังซื้อ หากอัตราการผลิตน้ำมันยังคงเป็นอยู่อย่างเช่นในปัจจุบัน คือ 24 ล้านบาร์เรล/ปี เราต้องเผชิญกับภาวะการขาดแคลนน้ำมันในปี 2583 อย่างแน่นอน ดังเหตุการณ์วิกฤตการณ์น้ำมันในช่วงศตวรรษที่ 1970 (ช่วงปี พ.ศ. 2513) เมื่อราคาน้ำมันสูงขึ้นอย่างมาก เป็นเหตุให้เกิดการตื่นตัวในการหาทางออกเกี่ยวกับเชื้อเพลิงอื่นๆ เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงจากพลังงานฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป โดยประเทศไทยนั้นเป็นประเทศทางเกษตรกรรม ส่งผลทำให้การนำเอาชีวมวลมาแปรรูปเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือก เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจมากในอนาคตเพราะเป็นเชื้อเพลิงที่หาง่าย ราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเชื้อเพลิงจากชีวมวลสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงเหลวที่เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ (Bio oil) ได้

การผลิตน้ำมันชีวภาพทำได้โดยการนำเอาชีวมวลผ่านกระบวนการลิกวิแฟกชัน (Liquefaction) ร่วมกับตัวทำละลายที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน โดยตัวทำละลายจะเลือกใช้พวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเตา เนื่องจากมีแนวคิดที่สามารถนำตัวทำละลายที่ผ่านกระบวนการลิกวิแฟกชันมาใช้ได้ใหม่ เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการใช้ตัวทำละลายพวกอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในสถานะของเหลว สีดำ มีความหนืดสูง มีกลิ่นที่เหม็น สามารถนำไปใช้งานได้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ โดยน้ำมันชีวภาพมีข้อดีคือ มีปริมาณซัลเฟอร์ ไนโตรเจนและเถ้าต่ำ ทำให้การเผาไหม้น้ำมันชีวภาพมีการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์และเขม่าน้อยกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมาก อีกทั้งยังถือว่าไม่มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide neutral) จึงนับได้ว่าน้ำมันชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชันและน้ำมันจากฟอสซิล พบว่าน้ำมันชีวภาพมีปริมาณองค์ประกอบของธาตุออกซิเจน ความชื้น ความเป็นกรด และกากจากการกลั่นสูงกว่าน้ำมันจากฟอสซิลอยู่มาก รวมทั้งค่าความร้อนที่ต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีในการกำจัดสารประกอบออกซิเจนออกจากน้ำมันชีวภาพ และปรับปรุงคุณภาพ (Upgrading) ของน้ำมันชีวภาพให้สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานต่อไปในอนาคต

## 2.2 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล 2549) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งไนโตรเจนและธาตุอื่นๆอีกเล็กน้อย สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ รวมทั้งเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพดกาบและ กะลามะพร้าว เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงพืชในกลุ่มของไม้โตเร็วที่ปลูกเพื่อใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงาน โดยตรง เช่น กระจินยักษ์ กระจินณรงค์ กระจินเทพา กระจินลูกผสมและยูคาลิปตัส เป็นต้น

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้นพืชใช้ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ เป็นแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืชการนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงจึงได้พลังงาน ดังกล่าวออกมาและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่บรรยากาศวนเวียนเป็นวัฏจักร (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม 2555) รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นวัฏจักรของชีวมวล ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานจะถูกนำกลับมาสร้างเป็นสารอาหารผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของชีวมวล (Greenenergy)

สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม ในกระบวนการแปรรูปและการผลิตผลผลิตทางการเกษตรต่าง ๆ จะมีชีวมวลเหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นพลังงานจากชีวมวลจึงถือเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญอย่างมาก ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันทั่วโลกจึงให้ความสนใจในการศึกษาและ

วิจัยเพื่อนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพโดยการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส

ในกระบวนการแปรสภาพชีวมวลหลากหลายวิธีที่ได้มีการศึกษาวิจัยมีบางกระบวนการถูกนำไปใช้จริงในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม แต่บางกระบวนการยังอยู่เพียงในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากปัจจุบันยังไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์จากเชื้อเพลิงฟอสซิล อีกทั้งยังมีข้อจำกัดบางประการในการผลิตพลังงานจากชีวมวล ได้แก่

- การขนส่งและการเก็บรักษาชีวมวลทำได้ยาก เนื่องจากชีวมวลมีความหนาแน่นต่ำทำให้ไม่เหมาะสมต่อการขนย้ายในระยะทางที่ไกลกับแหล่งผลิตของชีวมวล และยังต้องการพื้นที่ในการจัดเก็บ
- ปริมาณชีวมวลที่ไม่คงที่ เพราะชีวมวลบางชนิดจะมีช่วงฤดูการผลิตที่จำเพาะ นอกจากนี้สภาพภูมิอากาศในแต่ละปียังส่งผลต่อปริมาณชีวมวลที่สามารถผลิตได้

แต่อย่างไรก็ตามมีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นแรงขับเคลื่อนในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากชีวมวล อันได้แก่ ผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดความเสี่ยงต่อวิกฤตพลังงานในอนาคต และช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เป็นต้น

## 2.2.1 แหล่งกำเนิดชีวมวล

ชีวมวลที่มาจากพืชสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.2.1.1 ประเภทแรก ชีวมวลที่หาได้จากตามโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น

- แกลบได้จากโรงสีข้าว
- ปีกไม้ เศษไม้และขี้เลื่อยได้จากโรงเลื่อยไม้ โรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้
- ไยปาล์ม ทะลายเปล่าและกะลาปาล์มได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
- ชังข้าวโพดได้จากไซโลเก็บข้าวโพด
- ชานอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาล
- เปลือกมันสำปะหลังได้จากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง
- เปลือกไม้อยูคาลิปตัสได้จากโรงแปรรูปไม้ หรือโรงบดเศษไม้

ชีวมวลประเภทนี้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมทั่วไปเนื่องจากรวบรวมได้ง่าย

2.2.1.2 ประเภทที่สอง ชีวมวลที่หาได้จากไร่ สวน และนาข้าว เช่น

- ฟางข้าวอยู่ในนาข้าว
- ปลายไม้ และรากไม้หรือตอไม้บางพารอยู่ในสวนยางพารา
- ใบอ้อยและยอดอ้อยอยู่ในไร่อ้อย

- เหม่ง้ำมันสำปะหลังอยู่ในไร่มันสำปะหลัง
- ทางปาล์มหรือใบปาล์มอยู่ในสวนปาล์มน้ำมัน
- ชั่งข้าวโพดได้จากไร่ข้าวโพด เป็นต้น

การนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้งานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและรวบรวมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ราคาต่อค่าความร้อนสูงกว่าประเภทแรก จึงถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่น้อยมาก ดังนั้นชีวมวลประเภทนี้ส่วนใหญ่จึงถูกเผาทิ้งทุกปี

2.2.1.3 ประเภทที่สาม ชีวมวลที่ปลูกใหม่เพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะ เช่น การปลูกไม้โตเร็ว เพื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า

## 2.2.2 ข้อแตกต่างระหว่างชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิล

(ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล 2549)

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อแตกต่างระหว่างชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล มีข้อดีกว่าชีวมวลอยู่มากทั้งด้านปริมาณ การซื้อขาย และการขนส่ง รวมทั้งต้นทุนในการนำมาใช้งาน ส่วนชีวมวลมีข้อดีคือ สามารถคาดการณ์การแปรผันราคาของวัตถุดิบได้

2.2.2.1 ไม่มีปริมาณสำรอง ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นปีต่อปี จึงยากที่จะคาดการณ์ปริมาณที่เกิดขึ้นในระยะยาวได้ ซึ่งแตกต่างกับถ่านหินและแก๊สธรรมชาติเพราะมีปริมาณสำรองที่เห็นชัดเจน

2.2.2.2 อุปทาน (Supply) ไม่แน่นอน ชีวมวลจะเกิดขึ้นตามฤดูกาลเช่นเดียวกับผลผลิตทางการเกษตร ดังนั้นช่วงฤดูเก็บเกี่ยวจะมีปริมาณมาก นอกฤดูเก็บเกี่ยวจะมีปริมาณน้อยลงทำให้ราคาสูงขึ้น และมีลักษณะเป็นวงจรเช่นนี้ทุกปี นอกจากนี้สภาพแห้งแล้ง หรือฝนตกไม่ต้องตามฤดูกาลมีส่วนทำให้ปริมาณ ชีวมวลในปีนั้นๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย และยังขึ้นกับราคาของผลผลิตในปีที่แล้ว เช่น ถ้าราคาหัวมันสำปะหลังมีราคาตกต่ำ ชาวไร่ส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนไปปลูกข้าวโพดแทนในปีหน้า ดังนั้นปริมาณชั่งข้าวโพดในปีหน้าจะเพิ่มขึ้นแต่เหม่ง้ำมันสำปะหลังจะลดลง

2.2.2.3 อุปสงค์ (Demand) จากอุตสาหกรรมอื่นๆ ถ้ามีอุตสาหกรรมอื่นๆ ร่วมบริโภคด้วย แต่อุปทานคงที่ มีผลทำให้ชีวมวลมีราคาสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่บริโภคชีวมวลคือ

ด้านเกษตรกรรม เช่น การนำแกลบปูดโรงเลี้ยงไก่ การเพาะเห็ดจากขี้เลื่อย ฟางข้างและทะลายปาล์ม ซึ่งหลังจากใช้แล้วชีวมวลเหล่านี้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้อีก เช่น การทำปุ๋ย

โรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันโรงงานที่ใช้ความร้อนในกระบวนการผลิตนิยมใช้ชีวมวลทดแทนน้ำมันเตามากขึ้น เช่น โรงงานผลิตถลุงมีเยียง โรงงานน้ำมันพืช และโรงงานแป้งมัน เป็นต้น เพราะน้ำมันเตามีราคาแพงกว่าชีวมวลหลายเท่าตัว

อุตสาหกรรมเผาอิฐมอญ เป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ทำกันภายในครอบครัวเมื่อหลายร้อยปีมาแล้ว ใช้แกลบหรือเศษไม้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐ ปัจจุบันนี้มีผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทดแทนหลายชนิด เช่น อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และผนังสำเร็จรูป ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการผลิต และใช้แรงงานน้อยในการติดตั้งเมื่อเทียบกับอิฐมอญ

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลัก และเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้นำชีวมวลมาทดแทนส่วนหนึ่ง เช่น แกลบ กะลาปาล์ม และซีลี้อยู่ เนื่องจากมีราคาถูกกว่า อย่างไรก็ตามชีวมวลในปัจจุบันมีราคาสูงขึ้นมาก ซึ่งถ้ามีราคาสูงเท่ากับถ่านหินแล้ว คาดว่าโรงงานผลิตปูนซีเมนต์คงลดปริมาณการใช้ชีวมวลซึ่งขึ้นกับนโยบายผู้บริหาร

2.2.2.4 วิธีการซื้อขาย ส่วนใหญ่ใช้เงินสดเช่นเดียวกับการซื้อสินค้าเกษตร ไม่มีวงเงินเครดิตเหมือนสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป

2.2.2.5 การขนส่ง เนื่องจากชีวมวลจะมีน้ำหนักเบา ค่าใช้จ่ายในการขนส่งแต่ละครั้งสูงกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น การขนส่งน้ำมันเตา 12,000 ลิตร 10,000 บาท/เที่ยว คิดเป็นค่าใช้จ่าย 20 บาท/กิกะจูล แต่การขนส่งแกลบ 10 ตัน เสียค่าใช้จ่ายถึง 74 บาท/กิกะจูล เป็นต้น หรือในกรณีการขนส่งแก๊สธรรมชาติทางท่อ เสียค่าใช้จ่ายเพียง 20 บาท/ล้านบีทียูหรือ 20 บาท/กิกะจูล

**ตารางที่ 2.1** ข้อแตกต่างชีวมวลกับเชื้อเพลิงฟอสซิล (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล 2549)

	เชื้อเพลิงฟอสซิล	ชีวมวล
1. ปริมาณสำรอง	มี	ไม่มี
2. อุปทาน	สม่ำเสมอ	แปรผันตามฤดูกาล
3. การผันแปรของราคา	คาดการณ์ไม่ได้	คาดการณ์ได้
4. เครดิตการซื้อขาย	มี	ไม่มี
5. ต้นทุนขนส่ง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง

### 2.2.3 ประโยชน์ของชีวมวล

มนุษย์นำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานตั้งแต่สมัยโบราณแล้ว จนต่อมาโลกได้มีการพัฒนาเจริญมากขึ้น และใช้พลังงานเพิ่มขึ้น จึงได้นำเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติมาทดแทน ทำให้พลังงานจากชีวมวลมีบทบาทน้อยลงมากในปัจจุบัน

การนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีข้อดีหลายประการ คือ

2.2.3.1 การเผาไหม้สารทุกชนิดผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศและปกคลุมโลกไว้ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องลงมายังโลก ทำให้รังสีบางส่วนไม่สามารถสะท้อนกลับออกไปได้จึง

เกิดภาวะโลกร้อนหรือภาวะเรือนกระจก จึงเรียกคาร์บอนไดออกไซด์ว่า “แก๊สเรือนกระจก” แต่คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาชีวมวลจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้ด้วยพืชอีกครั้งด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง ดังนั้นการเผาชีวมวลจึงไม่ถือว่าเป็นการก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก

2.2.3.2 การปล่อยให้ชีวมวลถูกย่อยสลายตามธรรมชาติ เช่น มูลสัตว์ จะก่อให้เกิดมีเทนซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่ง และมีอันตรายต่อร่างกายมากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า

2.2.3.3 ชีวมวลมีกำมะถันไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้ จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องฝนกรด (น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3-3.8 ขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน)

2.2.3.4 ขี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นด่าง ดังนั้นเหมาะสมที่จะนำไปเพาะปลูกหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด แต่ขี้เถ้าจากการเผาถ่านหินมีสารโลหะหนักปะปนอยู่ ดังนั้นต้องนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธี เช่น มีฝ้ายกรองรับด้านล่าง เป็นต้น

2.2.3.5 ช่วยลดภาระในการกำจัด เช่น การนำไปฝังกลบ และเผาทิ้ง เป็นต้น

## 2.2.4 ศักยภาพของพลังงานชีวมวล

2.2.4.1 วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (กระทรวงพลังงาน 2552) จากการประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากพืช 10 ชนิดที่มีศักยภาพสูง ได้แก่ อ้อย ข้าว น้ำมันปาล์ม มะพร้าว มันสำปะหลังข้าวโพด ถั่วลิสง ฝ้าย ถั่วเหลือง และข้าวฟ่างในปี พ.ศ.2552 แสดงดังตารางที่ 2.2 พบว่ามีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรประมาณ 63 ล้านตันโดยถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นๆประมาณ 16 ล้านตันเท่ากับว่ามีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนที่ยังไม่ได้ใช้เท่ากับ 42 ล้านตันซึ่งเทียบเท่าพลังงาน 604.82 เพตาจูล ( $6.04 \times 10^{17}$  จูล)

2.2.4.2 มูลสัตว์ 6 ชนิด คือ มูลจากโคกระบือสุกรไก่เป็ดและช้างในปี พ.ศ. 2552 มีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ 560 ล้านลูกบาศก์เมตรคิดเป็นพลังงานประมาณ 11.75 เพตาจูล

2.2.4.3 ขยะ ในปี พ.ศ. 2552 กรมควบคุมมลพิษรายงานปริมาณขยะที่จัดเก็บได้ประมาณ 13.9 ล้านตันซึ่งมีปริมาณขยะรวมทั้งในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเขตเทศบาลเมืองพัทยาและนอกเขตเทศบาลทั่วประเทศถ้านำขยะร้อยละ 85 ของขยะทั้งหมดมาฝังกลบจะได้แก๊สชีวภาพจากการฝังกลบ 1,184.22 ล้านลูกบาศก์เมตรหรือเทียบเท่าพลังงาน 23.09 เพตาจูล

2.2.4.4 น้ำเสีย ในปี พ.ศ.2552 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตแก๊สชีวภาพจำนวน 11 ประเภทอุตสาหกรรมเช่นโรงฆ่าสัตว์โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม เป็นต้นมีศักยภาพที่จะผลิตแก๊สชีวภาพได้ 435.33 ล้านลูกบาศก์เมตรซึ่งเทียบเท่ากับพลังงาน 10.45 เพตาจูล



ตารางที่ 2.2 การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร(กระทรวงพลังงาน 2552)

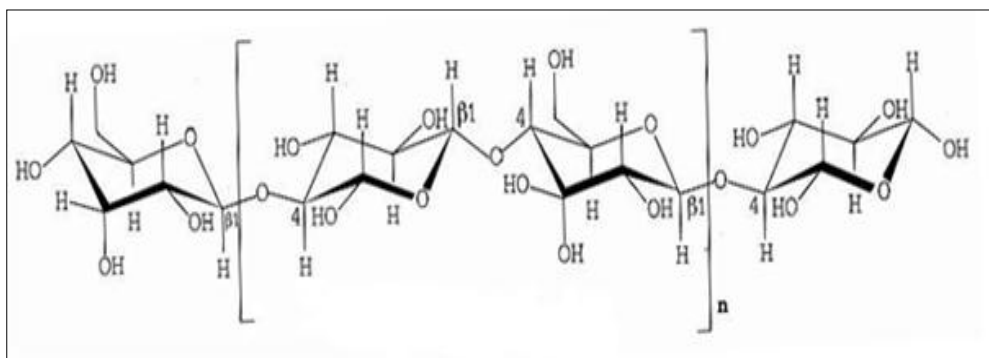
ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้ (ตัน)	ค่า ความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/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
		ทะลายเปล้า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	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
มันสำปะหลัง	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
		ก้าน	628,990.82	15.40	9,686.46	229.30
มะพร้าว	1,380,980	กาบ	464,250.95	16.23	7,534.79	178.36
		กะลา	128,936.58	17.93	2,311.83	54.73
ไม้ยางพารา	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

## 2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides)

### 2.3.1 เซลลูโลส

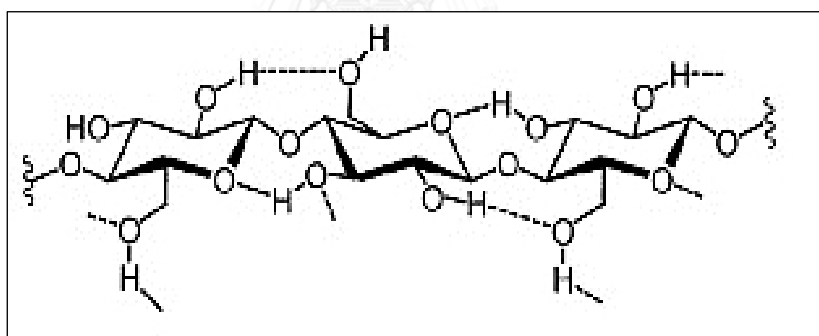
เซลลูโลสมีสูตรทั่วไปคือ  $[C_6(H_2O)_5]_n$  แสดงดังรูปที่ 2.2 เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ที่มีอยู่ในธรรมชาติ แต่ในธรรมชาติจะไม่พบเซลลูโลสในรูปอิสระแต่มักจะพบรวมอยู่กับลิกนิน เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืชและเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติมากที่สุด ประมาณร้อยละ 40-50% โดยน้ำหนัก สามารถสังเคราะห์ได้โดยพืช สาหร่าย และแบคทีเรียบางชนิด เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) ราเมือกเซลล์เดี่ยว (Cellular slime mold) และเพรียงหัวหอม (Ascidians) หน้าที่หลักของเซลลูโลสคือการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพืชในผนังเซลล์ เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์เส้นตรง (Linear polymer) ของบีต้ากลูโคส ( $\beta$ -glucose) เกิดจากหน่วยของ ดี-กลูโคส (D-glucose) ประมาณ 1,250 ถึง 12,500 โมเลกุลมาจับต่อกันด้วยพันธะ บีต้า-1,4 ไกลโคซิดิก (Beta-1,4 glycosidic bond) และมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในโมเลกุลถัดไป การจัดเรียงเช่นนี้ทำให้แต่ละสายโซ่ของเซลลูโลสเรียงตัวขนานซึ่งกันและกันอย่างมีระเบียบ จึงทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่เรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril) เส้นใยเหล่านี้จะถูกยึดติดกับองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น เฮมิเซลลูโลส เป็นต้น และถูกปกคลุมด้วยลิกนิน การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบดังกล่าวส่งผลให้เซลลูโลสมีโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนและสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เซลลูโลสมีความต้านทานต่อสารเคมีและเอนไซม์ เซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 240-350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (ทิพย์วงศ์ 2552)

### 2.3.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสมีสูตรทั่วไปคือ  $[C_5(H_2O)_4]_n$  แสดงดังรูปที่ 2.3 เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าเซลลูโลส โดยทั่วไปในพืชจะมีสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสรองจากเซลลูโลส โดยจะมีประมาณร้อยละ 20 ถึง 40 เฮมิเซลลูโลสที่พบในพืชส่วนใหญ่จะประกอบด้วยหน่วยของ ดี-ไซแลน (D-xylan) ซึ่งเป็นน้ำตาลไซโลสหลายโมเลกุลต่อกันด้วยพันธะปีต้า-1,4 โกลโคซิดิกเป็นหลัก เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขามากกว่าเซลลูโลส ความยาวของสายโซ่สั้นกว่าและโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous) เนื่องจากการจัดเรียงตัวจะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบหรืออยู่แบบสุ่ม ทำให้สามารถถูกย่อยเพื่อให้ได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวง่ายกว่าเซลลูโลส โดยเฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200-260 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยมาก แต่น้ำมันทาร์และถ่านชาร์น้อยกว่าเซลลูโลส สิ่งหนึ่งที่เฮมิเซลลูโลสต่างจากเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสสามารถสลายตัวได้ที่ภาวะไม่รุนแรงมาก ซึ่งก่อให้เกิดองค์ประกอบของน้ำตาลที่หลากหลาย โดยน้ำตาลส่วนมาก คือ ไซโลส (Xylose) ซึ่งจะขัดขวางการหมัก เนื่องจากน้ำตาลเพนโทส (Pentose) จะไม่ถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ (Chang 2007)



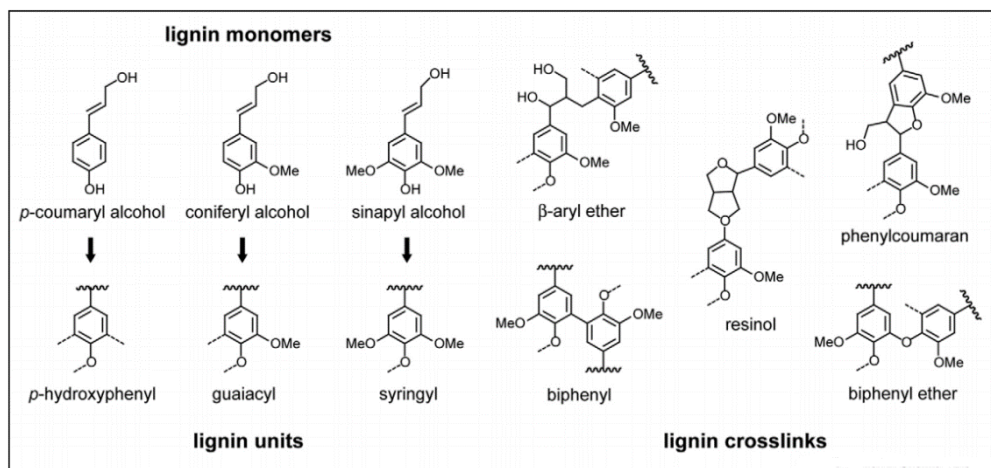
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Chang 2007)

### 2.3.3 ลิกนิน

ลิกนินมีสูตรทั่วไปคือ  $[C_{10}H_{12}O_4]_n$  เป็นสารที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต (ไม่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก) ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลสมีการเชื่อมขวางของพันธะมาก มีโครงสร้างซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 2.4 หน่วยฟีนิล (Phenyl) โพรเพน (Propane) สามารถเปลี่ยนไปเป็นแอโรมาติก (Aromatic) ได้ซึ่งพบมากในองค์ประกอบของพืชที่เป็นเส้นใย ปกติอยู่ในช่วงร้อยละ 17-30 ของชีวมวล ลิกนินจะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 280-500 องศาเซลเซียส และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก (Mohan, Pittman et



แสดงในรูปที่ 2.5 การสร้างตัวของลิกนินและอัตราส่วนของ 3 หน่วยย่อยจะเปลี่ยนไปเมื่อชนิดของ เซลล์และชนิดของพืชเปลี่ยนไป (Dorrestijn, Laarhoven et al. 2000)



รูปที่ 2.5 มอนอเมอร์ลิกนินและลักษณะการเชื่อมขวางบางชนิด (Chang 2007)

เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของชีวมวล พบว่ามีความแตกต่างกันตามชนิดของชีวมวล และอายุของพืช เป็นต้น ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สามารถแบ่งประเภทของพืชตามปริมาณลิกนินได้ 4 ประเภท คือ ชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินต่ำมาก คือ น้อยกว่าร้อยละ 10 ชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินต่ำ คือ ร้อยละ 10-20 ชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินปานกลาง คือ ร้อยละ 20-30 และชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินสูง คือ มากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งชีวมวลที่เลือกมาในแต่ละช่วง คือ ฟางข้าว แกลบ ต้นกระถินยักษ์ และกะลาปาล์ม ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของชีวมวล

ร้อยละโดยน้ำหนัก				
ชีวมวล	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	ที่มา
สาหร่ายขนาดเล็ก	7.10	16.3	1.52	Ververis และคณะ (2007)
ฟางข้าว	33.0	26.0	7.00	Lee และคณะ (2005)
กากสับุดำ	13.5	26.8	12.4	Yanna และคณะ (2010)
ซังข้าวโพด	45.0	35.0	15.0	Kingsuwanarut (2002)
ลำต้นปาล์ม	41.0	34.0	16.5	Punsuvon และคณะ(2005)
ใบอ้อย	45.0	25.0	18.0	Pushpaและคณะ (2008)
ชานอ้อย	33.4	30.0	18.9	Daniella และคณะ (2009)
ลำต้นข้าวโพด	38.9	25.1	19.5	ChunLian และคณะ (2009)
แกลบ	35.0	25.0	20.0	Worasuwanarak และคณะ(2007)
ใยปาล์ม	40.0	39.0	21.0	Arshad และคณะ (2010)
ทะลายปาล์ม	40.0	36.0	24.0	Arshad และคณะ (2010)
ต้นกระถินยักษ์	45.8	21.1	33.1	Mefarref และคณะ (2011)
กะลามะพร้าว	14.0	32.0	46.0	Benoit และคณะ (2009)
กะลาปาล์ม	31.0	20.0	49.0	Arshad และคณะ (2010)

### 2.3.4 ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (Heating value) คือ พลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีจุดเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง ค่าความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ ขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนต่ำ คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ ส่วนค่าความร้อนสูง คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว โดยค่าความร้อนสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \text{LHV (MJ/kg)} + 0.02395(9H + \text{MC}_t)$$

ในการหาค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (MC<sub>t</sub>) และเศษเถ้า หรือได้จากการใช้สูตรอย่างง่ายคำนวณ เช่น สูตรของดulong (Dulong formula) และสูตรของเดเมียบาส (Demirba 1997) ดังสมการต่อไปนี้

สูตรของดulong (Dulong formula)

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

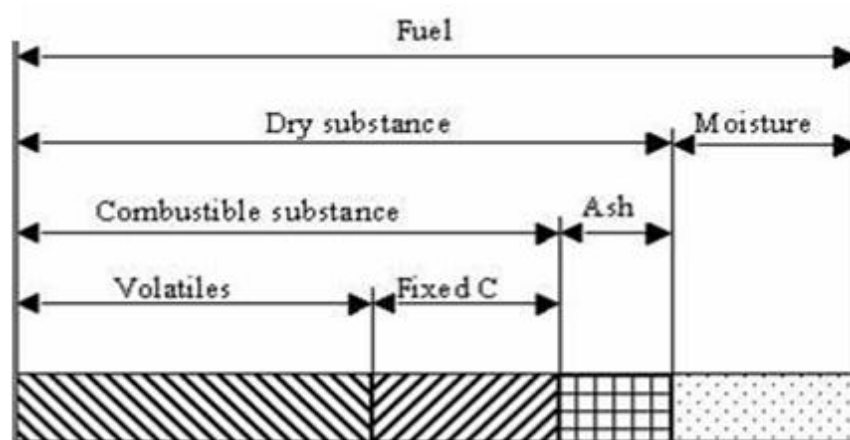
สูตรของเดเมียบาส (Demirbas, 1997)

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

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

### 2.3.5 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

ในการแสดงคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆ ในเชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของชีวมวล (Biomass composition) (ทิพย์าวงศ์ 2552)

2.3.5.1 ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวลโดยส่วนใหญ่แล้วชีวมวลมักมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงาน โดยการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

2.3.5.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles matter) และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) โดยสารระเหย คือ ส่วนที่เผาไหม้ง่าย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงที่นั้น เป็นคาร์บอนที่อยู่ในรูปของแข็ง

2.3.5.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือขี้เถ้า (Ash) เมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้วจะมีเนื้อสารบางส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้นั้น คือขี้เถ้า โดยชีวมวลแต่ละประเภทนั้นจะมีสัดส่วนของปริมาณขี้เถ้าในชีวมวลแตกต่างกัน

## 2.4 แนวทางการใช้ชีวมวลในประเทศไทย

ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนระยะ 15 ปี (ปี 2552-2565) ได้กำหนดเป้าหมายที่ประเทศไทยจะต้องเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็น 20% ของการใช้พลังงานทั้งหมด เมื่อสิ้นสุดแผนในปี 2565 พลังงานทดแทนที่มีการส่งเสริมให้มีการนำมาใช้สูงสุด คือ พลังงานชีวมวลที่ตั้งเป้าให้มีการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงดังกล่าวที่ 3,700 เมกะวัตต์ ซึ่งปัจจุบันพลังงานชีวมวลส่วนใหญ่ได้มาจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร อาทิ แกลบ กากอ้อย กะลาปาล์ม แต่เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้มีไม่เพียงพอต่อความต้องการ ส่งผลให้การเสนอขายไฟฟ้าจากชีวมวลขยายตัวไม่มาก เพียง 1,644 เมกะวัตต์เท่านั้นเมื่อเทียบกับไฟฟ้าพลังงานลมและแสงอาทิตย์ที่เสนอขายเกินเป้าไปแล้ว การสนับสนุนให้มีการปลูกไม้โตเร็ว เช่น กระจิฉียง กระจิเทพา ยูคาลิปตัสมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากเป็นพันธุ์ไม้ที่มีการเจริญเติบโตเร็ว ปลูกง่ายทนต่อสภาพแห้งแล้งสามารถขึ้นได้ในพื้นที่ที่มีสภาพดินเสื่อมโทรมที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและเนื้อไม้ให้ค่าความร้อนสูงสามารถเพิ่มโอกาสให้แก่เกษตรกรและเพิ่มพื้นที่ป่าไม้ช่วยลดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็นไปตามเป้าหมายได้อีกด้วย

เป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือพลังงานในรูปแบบต่างๆ ไม่เป็นการเพิ่มปริมาณสุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่มีการผลิตชีวมวลขึ้นมาทดแทนชีวมวลที่ใช้ไป อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก ซึ่งหมายความว่า การใช้ชีวมวลจะช่วยลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ทางหนึ่งด้วย อีกทั้งปัจจุบันก็เป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้นๆ ของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนา



### 2.4.1 กระจินยักษ์

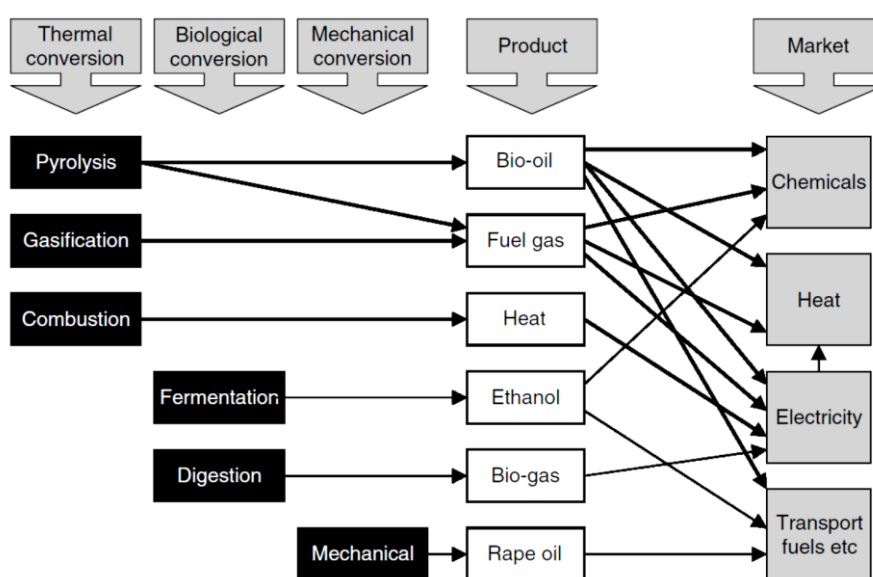
กระจินยักษ์ *Leucaena leucocephala* (lam.) de wit แสดงดังรูป 2.7 เป็นไม้ขนาดกลาง ไม้ผลัดใบลำต้นเรียบสีน้ำตาลแดงกระพี้สีเหลืองอ่อนเกือบขาวแก่นมีสีน้ำตาลแดง เปลือกบาง เนื้อไม้ เป็นเสี้ยนตรงเลื่อยได้ ตบแต่งได้ง่าย เนื้อไม้ใช้ในการก่อสร้างได้ดีมีรอบตัดฟันสั้น อายุ 5 - 6 ปีก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดีในการทำเสา รั้วพิน ถ่าน จนถึงการทำเยื่อกระดาษ จากการทดลองในต่างประเทศพบว่า ถ่านที่ทำจากไม้กระจินยักษ์ให้ความร้อนสูงประมาณ 7,000 แคลอรีต่อกิโลกรัม เทียบเท่ากับประมาณ 70 % ของน้ำมันเตา ถ้าพิจารณาในแง่ของการปลูกป่าเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้วจะ เห็นได้ว่าการปลูกป่ากระจินยักษ์จะช่วยแก้ปัญหาพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงที่กำลังขาดแคลนในอนาคต ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ใบกระจินยักษ์สามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้อีกด้วย เนื่องจากมีคุณค่าทาง อาหารสูง แต่หากให้เป็นอาหารสัตว์ติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้สัตว์ขบรังและหยุดเจริญเติบโตได้ เนื่องจากมีสาร Mimosine นอกจากนี้กระจินยักษ์เป็นพืชตระกูลถั่วจึงสามารถปลูกเพื่อบำรุงดินได้ ในต่างประเทศมีรายงานว่าแบคทีเรียในปมรากสามารถตรึงไนโตรเจนได้มากกว่า 5,000 กิโลกรัมต่อ พื้นที่ 1 เฮกเตอร์ ดังนั้นการปลูกป่ากระจินยักษ์จะช่วยปรับปรุงป่าที่เสื่อมโทรมให้กลับเป็นสภาพป่าที่ อุดมสมบูรณ์ได้เพราะกระจินยักษ์เติบโตเร็วมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและช่วยในการปรับปรุง ดินและในแง่ของเกษตรกรรมการปลูกพืชระหว่างต้นกระจินยักษ์ก็จะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีอีก ด้วย



รูปที่ 2.7 แปลงปลูกต้นกระจินยักษ์ (Greencoun 2012)

## 2.5 กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง

ชีวมวลและของเสียทางการเกษตรสามารถแปรรูปไปเป็นพลังงานได้โดยผ่านกระบวนการเชิงความร้อน และเชิงกลดังแสดงโดยสรุปในรูปที่ 2.8 กระบวนการเชิงความร้อนในปัจจุบันเป็นที่นิยมในยุโรปและแคนาดาขณะที่การผลิตเอทานอลเป็นที่นิยมในสหรัฐอเมริกา แกซีพีเคชั่นปัจจุบันยังอยู่ในขั้นพัฒนาและทดลองซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ การไพโรไลซิสแบบเร็วยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนา แต่การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงเหลวต้องมีสมบัติในการจัดเก็บและการขนส่งที่ดี



รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตและการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล

(Bridgwater 2006)

ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการดำเนินการ และวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการอย่างไรก็ตาม แม้ว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีจะเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แต่วิธีการนี้ค่อนข้างให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลค่อนข้างมาก จึงทำให้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนมีความน่าสนใจมากกว่าทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่หลากหลายกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี

ในกระบวนการแปรสภาพชีวมวลหลากหลายวิธีที่ได้มีการศึกษาวิจัยมีบางกระบวนการถูกนำไปใช้จริงในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม แต่บางกระบวนการยังอยู่เพียงในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากปัจจุบันยังไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์จากเชื้อเพลิงฟอสซิล อีกทั้งยังมีข้อจำกัดบางประการในการผลิตพลังงานจากชีวมวล ได้แก่

- การขนส่งและการเก็บรักษาชีวมวลทำได้ยาก เนื่องจากชีวมวลมีความหนาแน่นต่ำทำให้ไม่เหมาะสมต่อการขนย้ายในระยะทางที่ไกลกับแหล่งผลิตของชีวมวล และยังต้องการพื้นที่ในการจัดเก็บในขนาดที่มาก
- ความไม่คงที่ของปริมาณชีวมวล เพราะชีวมวลบางชนิดจะมีช่วงฤดูการผลิตที่จำเพาะ นอกจากนี้สภาพภูมิอากาศในแต่ละปียังส่งผลต่อปริมาณชีวมวลที่สามารถผลิตได้

แต่อย่างไรก็ตามมีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นแรงขับเคลื่อนในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากชีวมวล อันได้แก่ ผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดความเสี่ยงต่อวิกฤตพลังงานในอนาคต และช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เป็นต้น

### 2.5.1 กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion process)

การเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงาน โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion process) เป็นการนำพลังงานความร้อนทำให้โครงสร้างทางเคมีของชีวมวลนั้นเปลี่ยนรูปไปตามความต้องการ สามารถทำได้หลายกระบวนการยกตัวอย่างเช่น การเผาไหม้โดยตรง การแปรรูปเป็นแก๊สชีวมวล และการย่อยสลายด้วยความร้อน วิธีการที่แตกต่างกันนี้จะให้ผลิตภัณฑ์แตกต่างกันซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สแล้วแต่กรณี กระบวนการทางเคมีความร้อนอาจแบ่งออกเป็น 4 วิธี คือ การเผาไหม้ (Combustion) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และลิกวิแฟกชัน (Liquefaction)

#### 2.5.1.1 การเผาไหม้ (Combustion) (Yang, Sharif et al. 2008)

คือกระบวนการแปรรูปชีวมวลโดยใช้ความร้อนในภาวะที่มีอากาศเกินพอ ทำให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ สารอินทรีย์ในชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และความร้อน วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มานาน เช่น การใช้ฟืนและถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงการหุงต้ม ไม้ฟืนที่นำมาใช้อาจเป็นไม้จากป่าธรรมชาติ ป่าที่ปลูกเพื่อผลิตพลังงาน หรือเศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรมไม้ ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิในการเผาไหม้ ลักษณะของเตาเผา ปริมาณความชื้นของชีวมวล และปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในการระเหยน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วย

ส่วนที่ติดไฟ 2 ส่วน คือ สารระเหย และคาร์บอนคงตัว ในกระบวนการเผาไหม้สารระเหยมักสูญเสียไป โดยทั่วไปเชื้อเพลิงชีวมวลมีพลังงานอยู่ในสารระเหยถึง 3 ใน 4 ส่วนของพลังงานทั้งหมด ถ้าไม่มีการเก็บสารระเหยนี้กลับมา ก็จะทำให้สูญเสียพลังงานไป

การเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคของแก๊ส เป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส และช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้า ภาวะที่ใช้ดำเนินการ คือ อุณหภูมิตั้งแต่ 800-1,400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศกินพอ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการใช้อากาศกินพอน้อยเกินไปจนทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (Potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือ คาร์บอน (C)

#### 2.5.1.2 แก๊สฟิเคชัน (Gasification) (Ptasinski, Prins et al. 2007)

คือกระบวนการเปลี่ยนสภาพทางเคมีโดยการสลายคาร์บอนในเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สโดยการเผาชีวมวลในอุปกรณ์ที่ควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า แก๊สชีวมวล ซึ่งจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือ เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน แก๊สชีวมวลที่ได้ประกอบด้วยไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ กระบวนการแปรรูปชีวมวลเป็นแก๊สชีวมวลเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส แต่จะเกิดที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป

#### 2.5.1.3 ไพโรไลซิส (Pyrolysis) (Bridgwater and Peacocke 2000)

คือกระบวนการย่อยสลายชีวมวลโดยใช้ความร้อนในที่ที่มีอากาศปริมาณจำกัด โดยจะเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวของแข็ง และแก๊ส การย่อยสลายด้วยความร้อนเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible chemical process) ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียสขึ้นไป และจะต้องป้อนอากาศในปริมาณจำกัด แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มีเทน (CH<sub>4</sub>) และเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆอีกเล็กน้อย ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการนี้ได้แก่ ชาร์ (Char) และขี้เถ้า (Ash) สำหรับส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำมัน น้ำ และน้ำส้มควันไม้หรือหรือน้ำมันดิน (Tar)

การย่อยสลายด้วยความร้อนแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) สามารถเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เช่น กระบวนการเผาถ่านเป็นการย่อยสลายไม้ด้วยความร้อน

เป็นวิธีที่ทำกันมาแต่โบราณ ไอที่ได้จากกระบวนการจะระเหยไป ปริมาณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เป็นตัวแปรที่สำคัญ และมีผลต่อทั้งอุณหภูมิและผลิตภัณฑ์ที่ได้

#### 2.5.1.4 ลิกวิแฟคชัน (Liquefaction) (ทิพยาวงค์ 2552)

คือการทำให้เป็นของเหลวผ่านกาย่อยสลายโมเลกุลของชีวมวลด้วยความร้อนร่วมกับการใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลว เพื่อผลิตน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยการทำลิกวิแฟคชันของสารชีวมวลจะเปลี่ยนสารชีวมวลให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนเหลวที่เสถียรโดยใช้อุณหภูมิต่ำและอัดความดันไฮโดรเจน ซึ่งอาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการดังกล่าวด้วย

ลิกวิแฟคชันสามารถทำได้ทั้งทางตรง(Direct liquefaction) และทางอ้อม(Indirect liquefaction) สำหรับการทำลิกวิแฟคชันโดยตรงนั้นจะเกี่ยวข้องกับการทำการไพโรไลซิสอย่างฉับพลัน เพื่อที่จะสามารถผลิตของเหลวและน้ำมัน หรือไอของสารอินทรีย์ที่สามารถเกิดการควบแน่นได้ ส่วนการทำลิกวิแฟคชันทางอ้อมนั้น จะเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำการเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งมาจากไพโรไลซิส (Pyrolysis) หรือแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลว ตัวอย่างเช่น เมทานอล ไดมethylอีเทอร์ และน้ำมันสังเคราะห์ฟิสเซอร์โทรปซ์ เป็นต้น

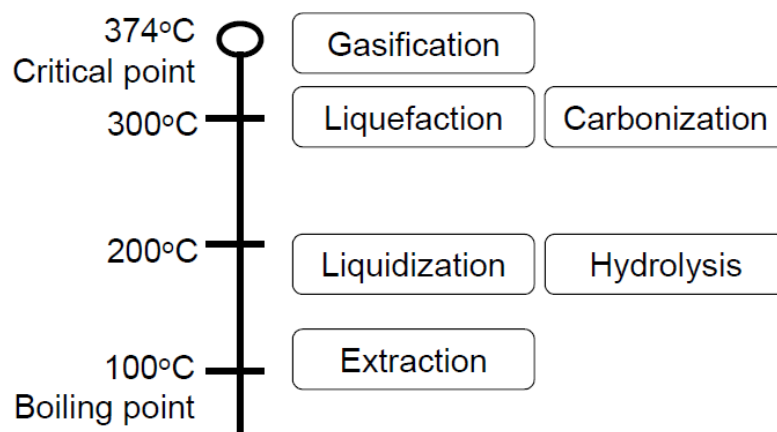
#### ไฮโดรเทอร์มัล ไพโรไลซิส (Hydrothermal pyrolysis)

ไฮโดรเทอร์มัล ไพโรไลซิส (Hydrothermal pyrolysis) คือ การย่อยสลายชีวมวลในน้ำที่มีความดันสูงประมาณ 10 เมกะปาสคาล และอุณหภูมิสูงประมาณ 300-350 องศาเซลเซียส สารชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็น ของเหลว และของแข็ง ซึ่งคล้ายกับไพโรไลซิสในเฟส ของเหลวที่มีน้ำหนักเบา เช่น กรดไพโรลิกเนียสหรือน้ำส้มควันไม้ นั้นจะละลายน้ำได้ น้ำมันดินหรือทาร์ที่มีน้ำหนักมากจะได้รับการผสมกันกับซาร์ ดังนั้น ผลิตภัณฑ์จึงได้แก่ สารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ และสารจำพวกน้ำมัน

#### - คุณลักษณะของไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส

ไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิสนั้นทำปฏิกิริยาในน้ำ วัตถุประสงค์ตั้งต้นไม่ต้องผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับสารชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูง เช่น สารชีวมวลน้ำ กากอินทรีย์ ขยะ และอื่นๆ นอกจากนั้นปฏิกิริยาหลายชนิดสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูงประมาณ 100 องศาเซลเซียส สารที่ละลายได้จะละลายในน้ำและเหมาะกับการสกัดสาร เหนืออุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เกิดการไฮโดรไลซิสและสาร ชีวมวลจำพวก เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โปรตีนและอื่นๆจะถูกย่อยจากโพลีเมอร์

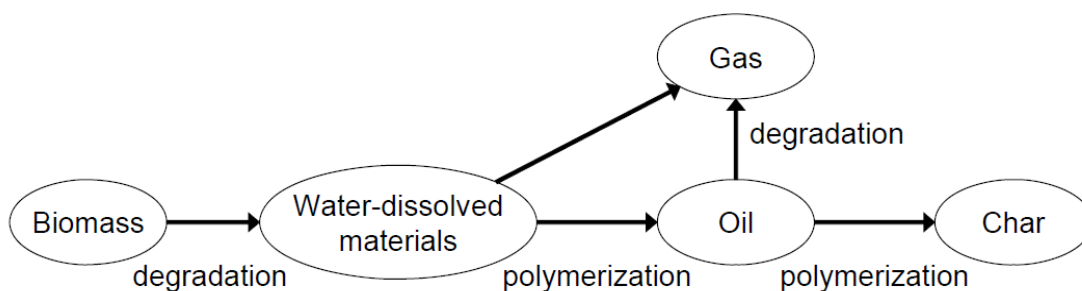
เป็นโมโนเมอร์ และที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1 เมกะปาสคาล ของแข็งจำพวกสารชีวมวลจะถูกทำให้กลายเป็นสารผสมในของเหลว และสารจำพวกน้ำมันยังไม่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียสและความดัน 10 เมกะปาสคาล เกิดปฏิกิริยาลิกวิแฟคชันซึ่งได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารจำพวกน้ำมัน และเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันซึ่งได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นถ่านชาร์



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาที่เกิดในน้ำที่ภาวะความดันและอุณหภูมิสูง (Yokoyama and Matsumura 2008)

- แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส

ไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิสจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวและปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน แผนผังปฏิกิริยาพื้นฐานแสดงในรูปที่ 2.10 ขั้นตอนแรกสารชีวมวลจะถูกสลายตัวเป็นสารที่ละลายน้ำ จากนั้นสารที่ละลายน้ำจะเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันเปลี่ยนเป็นน้ำมัน เมื่อเกิดปฏิกิริยานานขึ้น น้ำมันที่เกิดขึ้นจะเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันเปลี่ยนเป็นชาร์หรือเกิดการสลายตัวเป็นแก๊ส



รูปที่ 2.10 แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิสเบื้องต้น (Yokoyama and Matsumura 2008)

- ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส

น้ำมันที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส มีออกซิเจนสะสมอยู่ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จึงส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงสุดนั้นต่ำกว่าค่าของน้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลหนักจากปิโตรเลียม นอกจากนี้ความหนืดยังมีค่าสูง น้ำมันที่ได้จากชีวมวลมีความเป็นกรดสูง ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนและเกิดการโพลีเมอร์ไรเซชันระหว่างการกักเก็บดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาต่อจากกระบวนการนี้ เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งเรียกว่า กระบวนการ Hydrothermal upgrading (HTU)

Hydrothermal upgrading (HTU)

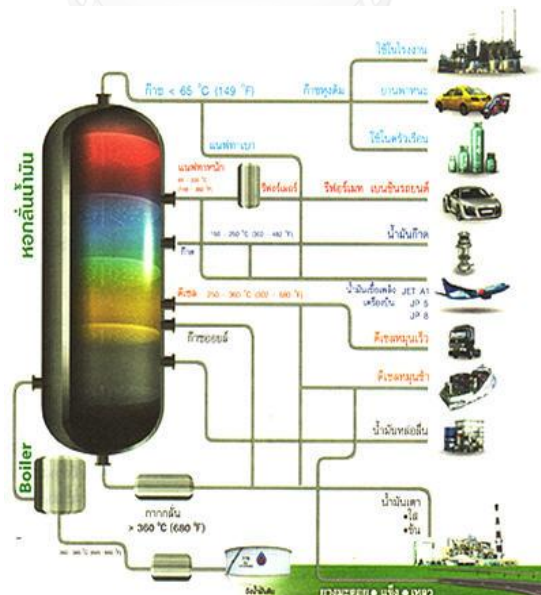
HTU คือ เทคโนโลยีการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งเหมาะสำหรับการป้อนวัตถุดิบชีวมวลที่เปียก (Wet biomass feedstocks) เช่น ผักบดที่บดละเอียด (Beet pulp), กากขยะ (Sludge) หรือ ชานอ้อย (Bagasse) ในอุณหภูมิที่ 300-350 องศาเซลเซียสและที่ภาวะความดันสูง ซึ่งสามารถแปลงชีวมวลนี้ให้กลายเป็นของเหลวชีวภาพที่เข้มข้นได้ ซึ่งของเหลวที่ได้นี้จะประกอบไปด้วยสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดที่เรียกว่าน้ำมันดิบชีวภาพ (Biocrude) ซึ่งคล้ายกับน้ำมันดิบปิโตรเลียม (Fossil Oil) และหลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการโดยการใช้เทคโนโลยีการสกัดเพื่อเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า Hydro-de-oxygenation (HDO) ซึ่งในกระบวนการนี้ออกซิเจนจะถูกแยกออกจากน้ำมันดิบชีวภาพโดยการใส่ไฮโดรเจนเข้าไปกระบวนการพัฒนาน้ำมันดิบชีวภาพให้มีคุณภาพสูงขึ้น โดยกระบวนการปรับปรุงน้ำมันดิบชีวภาพนั้นสามารถทำร่วมกับขั้นตอนการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพแบบขั้นตอนเดียว หรือนำน้ำมันดิบชีวภาพที่ผลิตได้ไปผ่านการปรับปรุงคุณภาพในอีกขั้นตอนหนึ่งซึ่งจัดเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันดิบชีวภาพแบบสองขั้นตอน

### โซลโวไลซิส ลิกวิแฟกชัน (Solvolysis liquefaction)

คือเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้สามารถผลิตน้ำมันได้มากขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 280-350 องศาเซลเซียสและที่ภาวะความดันสูง โดยวิธีนี้จะใช้ตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น เอทานอล เมทานอล อะซิโตน โทลูอิน เป็นต้น ซึ่งพบว่ากระบวนการนี้สามารถเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น รวมทั้งคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้ดีกว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส เนื่องจากตัวทำละลายที่เป็นพวกอินทรีย์สามารถย่อยสลายโครงสร้างหรือสายโซ่โมเลกุล (Depolymerization) ของชีวมวลได้ดี นอกจากนี้รีโซลโวไลซิส ลิกวิแฟกชันยังสามารถป้องกันการเกิดรีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Repolymerization) คือการรวมตัวกันของโมเลกุลเล็กๆ กลายเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ของชีวมวลและน้ำมันกลายเป็นของแข็ง ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณของแข็งลดลง

### 2.6 น้ำมันเตา (Fuel oil)

น้ำมันเตา (Boonjing and Asavasrivorakul 2006) คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากก้นหอกกลั่นอันเป็นส่วนที่ตกค้างอยู่หลังจากส่วนเบาๆ และมีมูลค่าสูงเช่น Distillate fuels ซึ่งได้แก่ น้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซล ได้ระเหยและกลั่นตัวไปจนหมดแล้ว ด้วยเหตุนี้ น้ำมันเตาจึงมีชื่อว่า Residual fuels (กากกลั่น) หรือ Heavy fuel oils ดังแสดงในรูป 2.11 ประเทศไทยมีหลายชนิด ตั้งแต่ใสถึงขุ่นมาก โดยนำมาผสมกับส่วนที่เบาให้มีความหนืดที่เหมาะสม



รูปที่ 2.11 แสดงผลิตภัณฑ์น้ำมันเตาที่ได้จากหอกกลั่น (วิชาการดอทคอม 2010)



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์น้ำมันเตาซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรม เพราะราคาถูก ใช้งาน ให้ความร้อนสูง ไม่มีซัลเฟอร์ ในบรรดาผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเตามีราคาต่ำที่สุด ชนิดของน้ำมันเตาที่ใช้ขึ้นอยู่กับประเภทของเตาและหัวฉีด บางชนิดก็ออกแบบสำหรับใช้กับน้ำมันเตาที่ข้นมากๆ ได้ บางชนิดก็ใช้กับน้ำมันที่ใส น้ำมันเตาสวนใหญ่จะใช้กับหม้อน้ำ เตาเผา เตาหลอมในอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยที่เป็นของเหลวจึงขนถ่ายง่าย เก็บง่าย และใช้งานง่าย จัดเป็นคู่แข่งที่สำคัญสำหรับเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ เช่น แก๊สซึ่งมีราคาแพงและขนถ่ายยาก หรือถ่านหินและเชื้อเพลิงแข็งอื่นๆ ซึ่งใช้ยากกว่าและประสิทธิภาพไม่ดี



รูปที่ 2.12 ผลิตภัณฑ์น้ำมันเตา (Sriwaragroup 2009)

### 2.6.1 ประเภทของน้ำมันเตา

แสดงในตารางที่ 2.4 โดยน้ำมันเตาสวนใหญ่แบ่งออกเป็น 5 ประเภท แต่ที่นิยมใช้กันทั่วไปมีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2009)

**2.6.1.1 น้ำมันเตาชนิดที่ 1 หรือเตา A หรือ เตา 600 (Fuel oil 600, 2% sulphur)** เป็นน้ำมันเตาใส (Light fuel oil ; LFO) มีความหนืดไม่เกิน 80 เซนติสโตรก (Centistroke, cst) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (ประมาณ 600 Redwood) ซึ่งเป็นความหนืดที่ไม่ต้องอุ่นมากนักก็สามารถฉีดเป็นฝอยได้ดี เเผาไหม้ง่าย ปริมาณตะกอนและน้ำน้อยกว่าน้ำมันเตาเกรดอื่น และมีราคาแพงกว่าน้ำมันเกรดอื่น น้ำมันเตาใสนี้จึงเหมาะกับโรงงานที่ใช้ น้ำมันเตาไม่มากนัก ใช้ อุปกรณ์หัวเผาไหม้สะอาด ไม่มีควันดำ เขม่า ละออง ถ่าน หรือก๊าซกำมะถันสูง เช่น อุตสาหกรรมทำกระเบื้อง หรือโรงงานที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนที่กฎหมายควบคุม

**2.6.1.2 น้ำมันเตาชนิดที่ 2 หรือเตา C หรือ เตา 1500 (Fuel oil 1500, 2% sulphur)** หรือเรียกว่าน้ำมันเตากลาง (Medium fuel oil ; MFO) มีความหนืดไม่เกิน 180 เซนติสโตรก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (ประมาณ 1,500 Redwood) ในการที่จะเผา น้ำมันเตากลาง

อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีระบบส่งน้ำมันที่ดี สามารถส่งน้ำมันได้ทันตลอดเวลาและสามารถกรองสิ่งสกปรกออกได้ นอกจากนี้ หัวเผายังต้องสามารถอุ่นน้ำมันให้ได้ความหนืดตามที่หัวฉีดต้องการ น้ำมันเตากลางนี้มักเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้กับโรงงานขนาดปานกลางจนถึงขนาดใหญ่

**2.6.1.3 น้ำมันเตาชนิดที่ 3 หรือเตา D หรือ เตา 2500 (Fuel oil 2500, 2% sulphur)** น้ำมันเตาหนัก (Heavy fuel oil ; HFO) มีความหนืดไม่เกิน 280 เซนติสโตรอก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (ประมาณ 2,500 Redwood) ซึ่งเป็นความหนืดที่สูงมากสำหรับเชื้อเพลิงเหลว นอกจากนี้ยังมีจุดไหลเทถึง 30 °C ฉะนั้นการที่จะใช้น้ำมันชนิดนี้จำเป็นต้องติดตั้งปั๊มส่ง มีระบบกรองสิ่งสกปรกก่อนถึงหัวฉีด หัวเผาควรเป็นแบบที่สามารถใช้กับน้ำมันที่มีความหนืดสูง น้ำมันเตาหนักนี้เหมาะกับโรงงานที่มีเตาเผาขนาดใหญ่ มีระบบส่งน้ำมันที่ดีและอุปกรณ์อุ่นน้ำมันที่เหมาะสมเพียงพอ อย่างไรก็ตาม น้ำมันเตาหนักนี้มีราคาต่ำกว่าเกรดอื่นๆ ฉะนั้นจึงมีโรงงานบางแห่งที่ลงทุนดัดแปลงเพิ่มเติมอุปกรณ์เพื่อให้สามารถเปลี่ยนมาใช้ น้ำมันเตาหนักได้

**2.6.1.4 น้ำมันเตาชนิดที่ 4** หรือ เตา 2000 ไม่มีบริษัทใดผลิตออกจำหน่ายในปัจจุบัน

**2.6.1.5 น้ำมันเตาชนิดที่ 5** เป็นน้ำมันเตาเกรดพิเศษ (กำมะถันต่ำมาก)

## 2.6.2 คุณสมบัติของน้ำมันเตา

คุณสมบัติของน้ำมันเตา (Waffleice 2548) สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

**2.6.2.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)** ที่ 60 องศาฟาเรนไฮต์ (15.6 องศาเซลเซียส) แสดงค่าความหนักเบาของน้ำมัน เป็นตัวเลขจุดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ซึ่งสถาบันปิโตรเลียมแห่งอเมริกา (American Petroleum Institute : API) ได้กำหนดค่าความหนักเบาของน้ำมันขึ้นใหม่ เรียกว่า API โดยแสดง เป็นตัวเลขจำนวนเต็ม และมีจุดทศนิยมเพียง 1 ตำแหน่งขึ้นมาใช้แทนโดยกำหนดความสัมพันธ์กับความถ่วงจำเพาะแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{API Gravity @ 60 F} = 141.5 - 131.5$$

$$\text{Specific Gravity @ 60/60}$$

- น้ำมันที่มีความถ่วงจำเพาะเป็น 1 ดังนั้นจะมีค่า API เป็น 10 น้ำมันซึ่งเบากว่าน้ำจะมีตัวเลขมากกว่า 10 เป็นที่น่าสังเกตว่าน้ำมันที่เบา (เช่น น้ำมันเบนซิน ดีเซล) ตัวเลขค่าความถ่วงจำเพาะจะน้อยลง แต่ตัวเลขค่า API จะมากขึ้น ความหนักเบาของน้ำมันยังแสดง ถึงองค์ประกอบภายในเนื้อน้ำมันได้

**2.6.2.2 ความหนืด (Viscosity)** ความหนืดของน้ำมันเตามีความสำคัญต่อการไหลการสูบน้ำและการพ่นฝอยในระบบ การใช้น้ำมันเตาที่ใช้วิธีปล่อยให้น้ำมันไหลจากถังเก็บน้ำมันเอง (ตามสภาพแรงโน้มถ่วง) ควรใช้ท่อขนาด 3 นิ้ว และไม่ควรลดขนาดท่อหรือหักเลี้ยวมาก หม้อกรองน้ำมันที่

ละเอียดเกินไปอาจก่อให้เกิดการอุดตันได้ใน ถูคูหนาวที่มีอากาศเย็นจัด การปั๊มหรือการสูบล้างจะมี ประสิทธิภาพดี โดยน้ำมันที่เลือกใช้ควรมีความหนืด ไม่เกิน 100 เซนติสโตก และท่อทางดูดควรให้ สั้นที่สุด น้ำมันเตาทุกชนิดจะข้นเกินไปกว่าที่จะพ่นเป็นฝอยละเอียดได้ (Atomized) ดังนั้นน้ำมันเตา จะต้องถูกอุ่นให้ร้อนเพื่อลดความหนืดให้เหมาะสมกับชนิดของ หัวพ่นไฟ หรือหัวเผา (Oil burners)

2.6.2.3 จุดวาบไฟ (Flash point) เป็นเครื่องมือชี้ถึงอันตราย ที่จะเกิดจากการ จุดติด ไฟของน้ำมันในการเก็บ ขนส่ง สูบถ่าย และการนำไปใช้ น้ำมันเตาจัดอยู่ในประเภทน้ำมันที่ไม่น่ากลัว อันตราย สามารถเก็บในถังบนพื้นดินได้โดยปลอดภัย

2.6.2.4 จุดไหลเท (Pour point) มีความสำคัญต่อการจัดเก็บการปล่อยให้น้ำมันไหลเอง ในช่วงฤดูหนาว ถูคูหนาวนั้นโดยเหตุที่น้ำมันดิบ แลบตะวันออกกลางมีไขน้อย (แต่ปริมาณกำมะถันสูง) น้ำมันเตาที่ได้จึงมีจุดไหลเทต่ำไหลได้ดีในฤดูหนาว ในกรณีที่โรงกลั่นนำน้ำมันดิบแลบตะวันออกไกล จีนมาเลเซีย อินโดนีเซีย และแหล่งน้ำมันดิบในประเทศ ซึ่งมีไข (Wax) สูงมาก (แต่ปริมาณกำมะถัน ต่ำ) น้ำมันเตาที่ได้จึงมีจุดไหลเทค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามมาตรฐานของรัฐโดยกระทรวงพาณิชย์ก็ ควบคุมไว้ไม่ให้สูงมากและให้เหมาะสมกับการใช้งานทั่วประเทศ

2.6.2.5 ปริมาณกำมะถัน (Sulphur content) กำมะถันในน้ำมันเตาเมื่อเผาไหม้จะได้ เป็นซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sox ; SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) บางส่วนของ SO<sub>2</sub> จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศที่ เกิน (Excess air) ได้เป็น SO<sub>3</sub> SO<sub>2</sub> ไม่มีอันตรายใด ๆ กับหม้อน้ำหรือเตาเผา แต่เมื่อถูกปล่อยออกทาง ปล่องจะสร้างมลพิษทางอากาศ (Air pollution) เกิดอันตรายกับระบบทางเดินหายใจ และ/หรือ รวมตัวกับความชื้น หรือน้ำฝนในบรรยากาศ เกิดเป็นฝนกรดได้ SO<sub>3</sub> สามารถรวมตัวกับน้ำหรือ ความชื้น ได้เป็นไอของกรดกำมะถัน (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) กำมะถันในน้ำมันเตา อาจมีผลกระทบต่อคุณภาพ ผลิตภัณฑ์ เช่น อุตสาหกรรมการหลอมแก้ว กระจก การทำเซรามิค และอิฐทนไฟ เป็นต้น สำหรับ น้ำมันเตา ทดสอบด้วยวิธี ASTM D 129 (Low volatility product)

2.6.2.6 ปริมาณเถ้า (Ash) เถ้าคือสารประกอบของโลหะพวกโซเดียม (Na) วานาเดียม (Va) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) เหล็ก (Fe) และซิลิคอน (Si) สารประกอบเหล่านี้มี อยู่ในน้ำดิบตามธรรมชาติหรือ อาจมาจากน้ำทะเลในระหว่างขนส่งน้ำมันทางทะเล จากบรรจุภัณฑ์ จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ เป็นต้น เป็นผลให้ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ได้อย่าง สมบูรณ์

2.6.2.7 ปริมาณตะกอนและน้ำ (Sediment and Water content) ตะกอนได้แก่สาร หรือของแข็งที่ไม่ละลาย เช่น เกลือ ทราาย สิ่งสกปรก และเส้นใยของสารต่าง ๆ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้จะ ติดมากับน้ำมันดิบ และเหลือตกค้างอยู่ในส่วนของน้ำมันเตา ส่วนน้ำอาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการ ขนส่งทางเรือหรือจาก ความชื้นในอากาศ ตะกอนในน้ำมันเตาถ้ามีมากอาจเกิดการสะสมขึ้นในถังเก็บ ทำให้หม้อกรองน้ำมันอุดตัน รูหัวฉีดอุดตัน และสึกหรอได้ ส่วนน้ำจะสะสมอยู่กันถัง ทำให้เกิดสนิม

กีดกร่อนที่ถัง-ท่อทาง และ อุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ น้ำกับตะกอนถ้ารวมกันมากๆ อาจเกิดกลายเป็นตะกอนโคลนที่เรียกว่า สลัดจ์ (Sludge) เพื่อลดปัญหาอันเนื่องมาจากตะกอนและน้ำในน้ำมันเตาควรระบายน้ำออก จากกันถึงเก็บมาประจำทุก ๆ 1 - 2 สัปดาห์ หรือขึ้นอยู่กับความสกปรกที่ตรวจพบส่วนในถังเก็บและถังใช้งานประจำวันควรล้างทำความสะอาด ภายในทุก ๆ 2 ปี เป็นอย่างน้อย

**ตารางที่ 2.4** ประเภทและคุณสมบัติของน้ำมันเตาชนิดต่างๆ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2009)

ข้อกำหนด	อัตราสูง/ ต่ำ	น้ำมันเตา					วิธีทดสอบ
		ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 4	ชนิดที่ 5	
ปริมาณกำมะถัน ร้อยละโดย น้ำหนัก (Sulphur Content, %wt.)	ไม่สูงกว่า	2.0	2.0	2.0	2.0	0.5	ASTM D 4294
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6°C (Specific Gravity at 15.6/15.6 °C)	ไม่สูงกว่า	0.985	0.990	0.995	0.995	0.995	ASTM D 1298
ความหนืด (Viscosity, cSt)							ASTM D 445
ณ อุณหภูมิ 50 °C เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า	7	7	7	7	-	
ณ อุณหภูมิ 100 °C เซนติสโตกส์	ไม่สูงกว่า	80	180	230	280	-	
	ไม่ต่ำกว่า	-	-	-	-	3	
	ไม่สูงกว่า	-	-	-	-	30	
จุดวาบไฟ °C (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	60	60	60	60	60	ASTM D 93
จุดไหลเท °C (Pour Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	24	24	30	30	57	ASTM D 97
ปริมาณความร้อน แคลอรี/กรัม (Gross Heat of Combustion, cal/g)	ไม่ต่ำกว่า	10,000	9,900	9,900	9,900	9,900	ASTM D 240
เถ้า ร้อยละโดยน้ำหนัก (Ash Content, %wt.)	ไม่ต่ำกว่า	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	ASTM D 482
น้ำและตะกอน ร้อยละโดยปริมาตร (Water and Sediment, %vol.)	ไม่ต่ำกว่า	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	ASTM D 1796
สี (Color)	ไม่ต่ำกว่า	8.0	-	-	-	-	ASTM D 1500

### 2.6.3 ลักษณะการใช้งานของน้ำมันเตา

จัดได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.6.3.1 ใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ

- หม้อน้ำขนาดใหญ่ ผลิตไอน้ำความดันสูง อุณหภูมิสูง ขับเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าใน โรงไฟฟ้า โรงงานน้ำตาล และในระบบ Co-generation เป็นต้น

- หม้อน้ำขนาดเล็กผลิตไอน้ำความดันต่ำที่เรียกว่า Process steam ใช้ถ่ายเทความร้อนใน กระบวนการผลิตต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การอบผ้า ย้อมผ้า อบกระดาษ เป็นต้น

2.6.3.2 ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การถลุงแร่, เเผาเตาหรือเข้า หลอมโลหะ, เเผาโลหะเพื่อการรีดเป็นเส้น,เพื่อการตีขึ้นรูป, เเผาโลหะเพื่อการชุบแข็ง, เเผาในเตา เซรามิกและเตาเผาอิฐ การหลอมแก้ว เเผาปูนซีเมนต์ ปูนขาว เป็นต้น

2.6.3.3 ใช้เป็นเชื้อเพลิงเดินเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่หมุนช้ามากในเรือเดินสมุทร และ เครื่องยนต์ดีเซลหมุนปานกลางขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่กับที่โรงงานอุตสาหกรรม และในเรือ เดินสมุทร มีหลายชนิด โดยแยกตามความหนืด เป็นต้น

### 2.7 น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil)

ลักษณะทั่วไปของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เป็นของเหลวอินทรีย์สีน้ำตาลดำ มีสารประกอบที่มี ออกซิเจนอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก อาจมีชื่อเรียกอื่นๆ เช่น น้ำมันไพโรไลซิส ของเหลวไพโรลิกเนียส กรดไพโรลิกเนียส น้ำส้มควันไม้ ของเหลวควันไม้ เป็นต้น น้ำมันไพโรไลซิสเกิดขึ้นจากการแตกตัวทาง ความร้อนและการลดระดับเชิงพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน น้ำมันดิบชีวภาพจึงมีสารเคมีที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงเป็นองค์ประกอบมากมาย ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพขึ้นอยู่กับภาวะของการไพโรไลซิส โดยทั่วไปแล้วน้ำมันดิบ ชีวภาพเป็นสารผสมละลายน้ำได้ มีสารอินทรีย์ที่มีประจุอยู่ประมาณร้อยละ 75-80 โดยน้ำหนัก และมี น้ำอยู่ประมาณร้อยละ 20-25 นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังมีออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 35-40 โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในสารประกอบมากกว่า 300 ชนิดที่พบในน้ำมันชีวภาพ ในเชิงเคมีน้ำมันไพโรไลซิสเป็น ส่วนผสมที่ซับซ้อนระหว่างน้ำ, กุไออาคอล (Quaiacol), คาเทคอล (Catecols), ไซริงกอล (Syringols), วานิลลิน (Vanillins), ฟุรancarboxaldehydes), ไอโซยูจินอล (Isoeugenol), ไพโรนส์ (Pyrones), กรดแอสติก, กรดฟอร์มิก และกรดคาร์บอกซิลิกอื่นๆ สารประกอบกลุ่มหลักๆ เช่นไฮดรอกซีแอลดีไฮด์, ไฮดรอกซีคีโตน, น้ำตาล และสารประกอบฟีนอล

สมบัติของน้ำมันชีวภาพนั้นค่อนข้างแตกต่างจากน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากองค์ประกอบทางกายภาพที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และสามารถอธิบาย ดังนี้

**ตารางที่ 2.5** สมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้และน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก (Banks, Nowakowski et al. 2014)

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเชื้อเพลิงหนัก
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15-30	0.1
ค่าความเป็นกรด	2.5	-
ค่าความถ่วงจำเพาะ	1.2	0.94
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
คาร์บอน	54-58	85
ไฮโดรเจน	5.5-7.0	11
ออกซิเจน	35-40	1.0
ไนโตรเจน	0-0.2	0.3
เถ้า	0-0.2	0.1
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	16-19	40
ค่าความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส (เซนติพอยซ์)	40-100	180
ของแข็ง(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2-1	1
กากที่เหลือจากการกลั่น(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	มากกว่า 50	1

### 2.7.1 ปริมาณออกซิเจน

น้ำมันชีวภาพนั้นมีปริมาณออกซิเจนร้อยละ 35-40 โดยน้ำหนัก แทรกอยู่ในรูปของสารประกอบมากมายในน้ำมันชีวภาพขึ้นกับชนิดของชีวมวลและความรุนแรงของกระบวนการผลิต (อุณหภูมิ, เวลาของปฏิกิริยาและอัตราการให้ความร้อน) ออกซิเจนที่แทรกตัวอยู่ในสารประกอบต่างๆ ของน้ำมันชีวภาพนั้น เป็นเหตุผลเบื้องต้นที่ทำให้สมบัติของน้ำมันชีวภาพแตกต่างจากน้ำมันปิโตรเลียม ปริมาณออกซิเจนที่สูงนั้นส่งผลให้ค่าความร้อนของน้ำมันลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 ของน้ำมันเชื้อเพลิงทางการค้า และไม่สามารถนำมาผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไปได้

## 2.7.2 ปริมาณน้ำ

น้ำในน้ำมันชีวภาพมาจากชีวมวลที่ป้อนเข้าไปและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออก ระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นปริมาณน้ำขึ้นกับชนิดชีวมวลและภาวะที่ใช้ ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นนั้น มีทั้งข้อดีและข้อเสียต่อสมบัติน้ำมันชีวภาพ น้ำทำให้ค่าความร้อนและอุณหภูมิในการลุกไหม้ของน้ำมันชีวภาพต่ำลง แต่มีส่วนช่วยในการเพิ่มความล่าช้าในการจุดติดไฟและบางกรณีช่วยลดอัตราการเผาไหม้เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ในทางตรงกันข้าม น้ำช่วยลด ความหนืดของน้ำมันลงซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลและทำให้ลดปริมาณการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์อีกด้วย

## 2.7.3 ความหนืดและอายุการใช้งาน

ความหนืดของน้ำมันชีวภาพอยู่ในช่วงกว้างขึ้นกับชนิดชีวมวลและภาวะการผลิต โดยเฉพาะประสิทธิภาพของสารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำภายในน้ำมันชีวภาพนั้นช่วยลดอุณหภูมิที่สูงลงได้เร็วกว่า น้ำมันปิโตรเลียม เมื่อทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลางจะสามารถสูบออกได้ง่าย แต่ข้อเสียของน้ำมันชีวภาพนั้น เมื่อเก็บไว้หรือใช้ที่อุณหภูมิสูง ค่าความหนืดจะสูงขึ้นตามเวลาเป็นผลมาจากสารประกอบของน้ำมันชีวภาพเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกันเกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศด้วย

## 2.7.4 การกัดกร่อน

น้ำมันชีวภาพประกอบด้วยกรดอินทรีย์มากมาย โดยเฉพาะกรดอะซิติกและฟอร์มิก ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ค่าความเป็นกรด 2-3 จากเหตุผลนี้ น้ำมันสามารถกัดกร่อนวัสดุภายในเครื่องยนต์ เช่น ท่อคาร์บอน และอะลูมิเนียม เป็นต้น

จากข้อมูลดังกล่าวจะพบว่า น้ำมันชีวภาพมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นกับการนำไปใช้ ถ้าพิจารณาข้อเสียของน้ำมันชีวภาพนั้น ส่วนสำคัญคือปริมาณออกซิเจนที่สูงส่งผลต่อคุณภาพน้ำมันชีวภาพ ค่าความหนืดที่สูง ค่าความร้อนและความเสถียรทางเคมีต่ำ มีฤทธิ์กัดกร่อน และไม่สามารถนำมาผสมกับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนได้ ดังนั้นการกำจัดออกซิเจนออกจากน้ำมันชีวภาพนั้นจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน

## 2.8 การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพมีสมบัติมากมายที่ด้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น มีค่าความร้อนต่ำ มีปริมาณออกซิเจนสูงและน้ำสูง มีความเป็นกรด ไม่เสถียร และไม่สามารถนำมาผสมรวมกับน้ำมันปิโตรเลียม

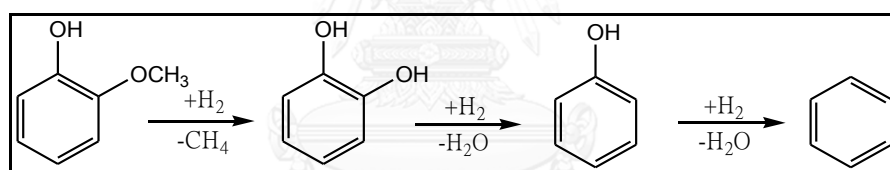
ได้ ซึ่งยากที่จะมีสมบัติที่ดีเทียบเท่ากับน้ำมันแก๊ซโซลีนและดีเซลถ้าไม่ได้ถูกปรับปรุง น้ำมันชีวภาพมีสารอินทรีย์มากกว่า 400 ชนิด และมีหมู่ฟังก์ชันหลากหลายหมู่ ได้แก่ กรด แอลดีไฮด์ คีโตน ฟูแรน สารประกอบฟีนอล กวายอะคอล เมทอกซีฟีนอล (Methoxyphenol) ซัยริงกอล (Syringol) และสารที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ น้ำมันชีวภาพที่มีคุณภาพต่ำมีสาเหตุมาจากการขาดแคลนอะตอมของไฮโดรเจนและมีปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ ในปัจจุบันเทคนิคหลัก ๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพประกอบด้วย ไฮโดรจิเนชันเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrodeoxygenation) การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) การรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic steam reforming) และ เอสเทอร์ฟิเคชันเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic esterification) (Yin, Wang et al. 2010)

### 2.8.1 กระบวนการขจัดสารประกอบออกซิเจนในการผลิตน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส พบว่ามีปริมาณของสารประกอบออกซิเจนอยู่มาก ซึ่งโดยมากจะอยู่ในรูปของกรดคาร์บอกซิลิก แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน และอนุพันธ์ของ ฟีนอลที่มีความยาวสายโซ่ต่างๆ กัน ทำให้น้ำมันที่ได้มีค่าความเป็นกรดสูงและข้นหนืดซึ่งเป็นผลเสียโดยตรงต่อเครื่องยนต์ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้ให้ใกล้เคียงกับน้ำมันจากปิโตรเลียมก่อนการใช้งาน การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพทำได้หลายวิธีเช่นการเติมตัวทำละลายเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ( Polymerization) ของสารประกอบที่ไม่เสถียรในน้ำมันชีวภาพ การเติมสารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidants) เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาโอเลฟิน พอลิเมอไรเซชัน (Olefin polymerization) และการเติมสารอิมัลซิฟายเคชัน (Emulsification) เพื่อลดปัญหาการแยกน้ำมันและเพิ่มความเสถียรให้น้ำมันชีวภาพ วิธีอิมัลซิฟายเคชันเป็นวิธีที่ง่ายในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ การผสมน้ำมันชีวภาพกับน้ำมันไฮโดรคาร์บอนดีเซลให้เป็นเนื้อเดียวกันสามารถทำได้โดยการเติมสารเซอร์แฟกแทนท์ (Surfactant) พบว่าน้ำมันชีวภาพผสมสารอิมัลซิฟายเออร์มีความเสถียรมากขึ้นและความหนืดของน้ำมันชีวภาพลดลง กระบวนการไฮโดรทรีทเมนต์ (Hydro treatment) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันทั้งในเรื่องของการทำให้บริสุทธิ์และการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี กระบวนการนี้จะดำเนินปฏิกิริยาภายใต้ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่นำมาใช้ผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยชีวมวลที่นำมาใช้ได้น้ำมันชีวภาพประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่หลากหลายในรูปของอนุพันธ์ฟีนอล อนุพันธ์เบนซีน คีโตน กรดคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์ อะลิฟาติก และอะโรมาติก แอลกอฮอล์ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้น้ำมันชีวภาพมีปริมาณออกซิเจนที่สูงถึงร้อยละ 40-50 โดยน้ำหนัก สาร



จำพวกกรดอินทรีย์ที่ประกอบอยู่ในน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนสำคัญของสาเหตุที่ทำให้ไขมันชีวภาพมีสภาพเป็นกรดด้วยเหตุนี้จึงต้องนำไขมันชีวภาพมาปรับเพิ่มคุณสมบัติ ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นกรดในการเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากกรดอินทรีย์ไปอยู่ในรูปของสารประกอบจำพวกเอสเทอร์มากขึ้น กระบวนการดังกล่าวจึงเป็นกระบวนการที่ทำให้ค่า pH โดยรวมของไขมันชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นและยังสามารถลดสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบลงได้ กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันจึงถูกประยุกต์ใช้กับกระบวนการกลั่น (Distillation) เพื่อทำให้น้ำที่ละลายอยู่ในไขมันชีวภาพถูกกำจัดไปด้วย ส่วนกระบวนการที่สามารถลดสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในไขมันชีวภาพให้มีปริมาณลดลงที่นิยมได้แก่กระบวนการไฮโดรดีออกซิเจนชัน (Hydrodeoxygenation) แสดงดังรูป 2.13 เป็นการใช้อ็อกโซล (Guaiacol) เพื่อเป็นตัวแทนสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ อ็อกโซลจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่มีปริมาณออกซิเจนในโมเลกุลลดลง ส่งผลทำให้คุณสมบัติที่ดีขึ้นในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น ความเป็นกรดลดลง ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น เมื่อเผาไหม้สามารถนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินหรือดีเซลได้ง่ายมากขึ้น เนื่องจากความมีขี้ของโมเลกุลลดลง เป็นต้น



รูปที่ 2.13 กระบวนการของปฏิกิริยา Deoxygenation ของ Guaiacol (M.Badawi, 2011)

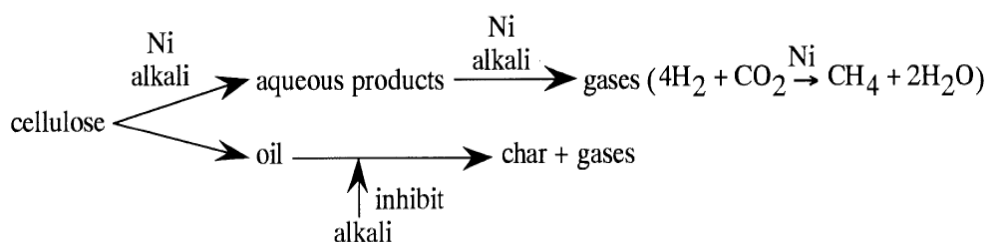
กระบวนการดีออกซิเจนชันเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic deoxygenation) เป็นกระบวนการในการกำจัดออกซิเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

- ไฮโดรดีออกซิเจนชัน (Hydrodeoxygenation) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนในรูปของน้ำ ( $H_2O$ )
- ดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนออกในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )
- ดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนออกในรูปของคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ )

- ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนโดยชีวมวลจะถูกทำให้เกิดการแตกออกของโมเลกุลให้ได้ขนาดเล็กแล้วเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลใหม่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) และดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation)
- ไฮโดรจิโนไลซิส (Hydrogenolysis) และไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนโดยการเติมไฮโดรเจนในระบบ

## 2.8.2 โลหะแอลคาไล และแอลคาไลน์เอิร์ทในไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าสารประกอบแอลคาไลมีผลต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิสซึ่งสารประกอบแอลคาไลสามารถเร่งกระบวนการแกซีฟิเคชัน (ปฏิกิริยา Water gas shift) และช่วยเพิ่มปริมาณร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ยังสามารถช่วยลดความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพ ซึ่งเกิดจากการส่งเสริมการดีไฮเดรชันของโมโนเมอร์ของชีวมวล ปริมาณออกซิเจนที่ถูกกำจัดผ่านทางคาร์ดีไฮเดรชันจึงมีมากขึ้นเมื่อเทียบกับการดีคาร์บอกซิเลชัน ส่งผลให้เกิดสารประกอบไม่เสถียรที่สามารถเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นถ่านชาร์หรือน้ำมันทาร์ได้ นอกจากนี้สารประกอบกลุ่มแอลคาไลยังมีผลต่อการยับยั้งการเกิดถ่านชาร์ แสดงดังรูปที่ 2.14 และมีรายงานการทดลองว่าสารประกอบแอลคาไลในรูปแบบของเกลือคาร์บอเนตมีผลในเชิงบวกต่อไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส โดยสามารถลดการเกิดถ่านชาร์และช่วยเพิ่มปริมาณร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ รวมทั้งสามารถเร่งปฏิกิริยา Water gas shift โดยส่งเสริมการเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์มากเกินไป ซึ่งไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นสามารถประพฤติตัวเป็นตัวรีดิวซ์ภายในไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส ส่งผลให้น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนสูงขึ้น และมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (Rudolf et al., 2011)



รูปที่ 2.14 แนวทางการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบแอลคาไลในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิสเซลลูโลส (Chongli et al., 2003)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jena and Das (2011) ศึกษาผลการเปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน 2 กระบวนการ คือ ลิควิแฟกชันที่อุณหภูมิ 350 กับไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 และ 500 องศาเซลเซียสของสาหร่ายภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เมื่อพิจารณาผลของร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเป็นหลัก พบว่าลิควิแฟกชันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสให้ร้อยละผลได้สูงถึงร้อยละ 41 ส่วนการทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 และ 500 องศาเซลเซียสให้ร้อยละผลได้เพียงร้อยละ 23 และ 29 ตามลำดับ ลิควิแฟกชันยังให้ร้อยละผลได้ของของแข็งน้อยกว่าการทำไพโรไลซิสร้อยละ 6.3 และร้อยละ 28-40 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการใช้พลังงานสุทธิในการผลิตน้ำมันชีวภาพ (Energy consumption ratio) พบว่าลิควิแฟกชันใช้พลังงานสุทธิต่ำกว่าการทำไพโรไลซิส เพราะไม่ต้องผ่านขั้นตอนการลดปริมาณความชื้นในชีวมวลและน้ำมันชีวภาพจากลิควิแฟกชันยังมีความเหมาะสมในด้านของการผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะน้ำมันชีวภาพที่ได้มีความเสถียรทางความร้อนสูง ทดสอบโดยการศึกษาค่าผลของเวลาที่เก็บรักษา พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบหลังการเก็บรักษาที่ต่ำกว่าไพโรไลซิส ข้อดีของลิควิแฟกชันอีกข้อหนึ่ง คือน้ำมันชีวภาพที่ได้ยังมีความร้อนของการเผาไหม้สูงกว่าน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิส จากงานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปว่าการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการทำลิควิแฟกชันเหมาะสมกว่าผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านการไพโรไลซิส

Yuan, Wang et al. (2011) ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพของสาหร่าย โดยใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกันในกระบวนการลิควิแฟกชันใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่ 570 ถึง 653 เคลวิน ตัวทำละลายที่ใช้ได้แก่ เมทานอล เอทานอลและ 1,4-ไดออกเซนเมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากเมทานอลและ เอทานอลกับ 1,4-ไดออกเซน พบว่าเมทานอลและเอทานอลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันสูงที่อุณหภูมิ 570 ถึง 640 เคลวิน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 650 เคลวิน พบว่า 1,4-ไดออกเซน ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันที่สูงกว่า ผลของร้อยละปริมาณธาตุในเชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่าเมทานอลมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนที่สูงและมีปริมาณออกซิเจนที่ต่ำ มีค่าความร้อนเท่ากับ 39.83 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ส่วนผลจากแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีพบว่าองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากเมทานอลและเอทานอลคือกรดเฮกซะเดคะโนอิก (Hexadecanoic acid) ส่วนน้ำมันชีวภาพที่ได้จาก 1,4-ไดออกเซน องค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพคือ เฮกซะเดเคนไนไตร (Hexadecanenitrile) ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเมทานอลและเอทานอลจะสนับสนุนการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ส่วนโครงสร้างที่เป็นฟีนอลหรือเฮทเทอโรไซคลิกจะได้จาก 1,4-ไดออกเซน จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการใช้ตัวทำละลายที่เป็นแอลกอฮอล์จะทำให้ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่สูง และต้ององค์ประกอบของธาตุในน้ำมันชีวภาพที่ดี

Liu, Yuan et al. (2013) ได้ทำการศึกษากระบวนการลิกวิแฟกชันของแอลกอฮอล์ในตัวทำละลายร่วมระหว่างเอทานอลกับน้ำ โดยทำการเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำและเอทานอลเพียงอย่างเดียวและผลของตัวทำละลายร่วมที่อัตราส่วนและอุณหภูมิแตกต่างกัน เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิที่ใช้ 533 ถึง 613 เคลวิน พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันที่ได้จากตัวทำละลายร่วมมีค่าสูงกว่า น้ำและเอทานอลที่ไม่ได้ผสม โดยที่อุณหภูมิ 533 เคลวิน อัตราส่วนของตัวทำละลายร่วม 5:5 มีค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุด เนื่องมาจากเอทานอลมีความสามารถในการแตกตัวที่สูงเกิดเป็นไฮโดรเจนฟรีเรดิคอลทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของชีวมวลที่แตกตัวเกิดเป็นน้ำมัน อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 613 เคลวิน การใช้ตัวทำละลายร่วมจะได้อัตราผลได้น้ำมันชีวภาพที่ลดลงเมื่อเทียบกับเอทานอลบริสุทธิ์ ซึ่งเนื่องจากน้ำที่เป็นตัวทำละลายร่วมส่งผลต่อการสลายตัวของน้ำมันชีวภาพกลายเป็นแก๊สที่เพิ่มขึ้นส่วนองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากตัวทำละลายร่วมของเอทานอลและน้ำ พบว่าได้แก่สารประกอบฟีนอลิกและเอสเทอร์ จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การใช้ตัวทำละลายร่วมให้อัตราผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่สูงกว่าการใช้ตัวทำละลายเพียงชนิดเดียว เพราะมีการส่งเสริมและสนับสนุนข้อดีของแต่ละชนิดของตัวทำละลาย

Kleinert, Gasson et al. (2009) ทำการศึกษาน้ำมันชีวภาพของลิกนินจากกระบวนการโซลโวไลซิสลิกวิแฟกชัน โดยใช้ตัวทำละลายร่วมระหว่างเอทานอลกับไอโซโพรพานอล (Ethanol-iso propanol) และมีการใช้สารเติมแต่งคือกรดฟอร์มิก (Formic acid) เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบเบดนิ่งมี 2 ขนาดคือ 25 มิลลิลิตรและ 75 มิลลิลิตร อุณหภูมิที่ใช้ 380 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดฟอร์มิก ปริมาณร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดฟอร์มิกเกิดการสลายตัวไปเป็นไฮโดรเจนฟรีเรดิคอล (Free-radical) และทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของชีวมวลกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของกรดฟอร์มิกมากเกินไป ปริมาณร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพมีค่าลดลงและปริมาณของแก๊สเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณของกรดฟอร์มิกที่มากเกินไปเกิดการสลายตัวไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำ

Chen, Wang et al. (2010) ทำการศึกษาค่าผลของน้ำมันชีวภาพจากฟางถั่วเหลือง (Soybean straw) และน้ำมันดอกทานตะวัน (Sunflower oil) โดยกระบวนการโคดีออกซิเลชัน (Co-deoxy liquefaction) ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเทอบูลาร์อุณหภูมิในการทดลองที่ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าอัตราส่วนน้ำหนักของชีวมวลต่อน้ำมันพืชมีผลต่อน้ำมันชีวภาพที่ได้ อัตราส่วนน้ำหนักที่เหมาะสมของชีวมวลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 4.4:1 ซึ่งพบว่าปริมาณของอัลเคนที่ร้อยละ 50.43 และน้ำมันชีวภาพที่ได้รับมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าร้อยละ 2.52 ซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนสูงถึง 43.36 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสรุปได้ว่าการใช้ชีวมวลร่วมกับน้ำมันพืชทำให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับดีเซลมากกว่าเมื่อเทียบกับที่ได้จากน้ำมันพืชเพียงอย่างเดียว

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์เหลวของเหลวที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์และศึกษาผลของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำรวมถึงปัจจัยดำเนินการต่างๆ ต่อคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพ

#### 3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 1) กระถินยักษ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 – 250 ไมโครเมตร
- 2) น้ำมันเตาเกรด A
- 3) ไดคลอโรมีเทน ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )
- 4) ไนโตรเจน 99.99% จาก บริษัท แพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 5) น้ำปราศจากไอออน

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมกระถินยักษ์

- 1) เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ
- 2) เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด
- 3) ตะแกรงร่อนขนาด 250 และ 150 ไมโครเมตร
- 4) เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve Shaker)

##### 3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง (Parr reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง ผลิตโดยบริษัท Parr Instrument Company (รูปที่ 3.1) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ตัวเครื่องปฏิกรณ์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel No. 316) ประกอบด้วย ส่วนให้ความร้อน (Heater) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) มาตรวัดความดัน (Pressure gauge) ระบบหล่อเย็น (Cooling system) และอุปกรณ์การกวนซึ่งประกอบด้วยใบกวนพร้อมชุดควบคุมและวัดความเร็วรอบของใบกวน โดยตัวเครื่องและอุปกรณ์ประกอบสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดไม่เกิน 350 บาร์

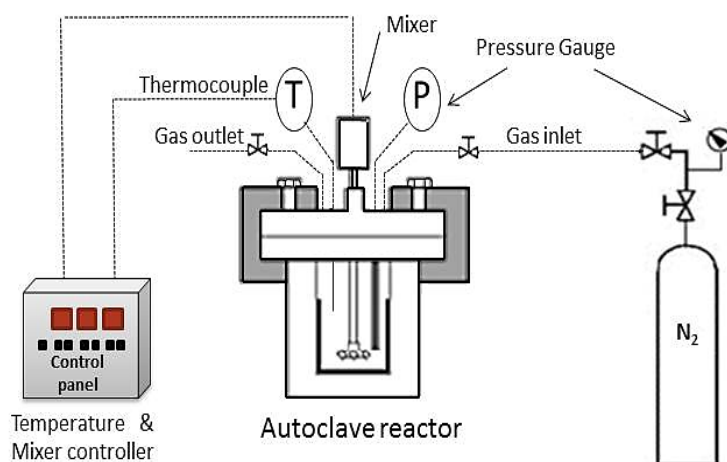


รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง (Parr reactor)

### 3.2.3 แบบจำลองอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้ (แสดงดังรูป 3.2)

- 1) ถังย Stainless ขนาด 350 มิลลิลิตร
- 2) ถังแก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์
- 3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- 4) เกจวัดความดัน (Pressure gauge)
- 5) ระบบให้ความร้อน (Heater)
- 6) ระบบหล่อเย็น (Cooling system)
- 7) ถุงเก็บแก๊สตัวอย่าง (Sampling bag) ขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง

### 3.2.4 อุปกรณ์การกรอง

อุปกรณ์การกรองประกอบด้วยกรวยบูชเนอร์ (Buchner funnel) ขวดกรอง (Suction or filter flask) เครื่องดูดอากาศ (Aspirator) และกระดาษกรอง Whatman GF/D

ขั้นตอนในการกรอง คือ นำส่วนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์(ของเหลวและของแข็ง) มาทำการกรองด้วยชุดกรอง ส่วนที่เป็นของแข็งด้านบน ทำการชะล้างด้วยตัวทำละลาย DCM เพื่อเอาส่วนของน้ำมันออกให้หมด นำส่วนของแข็งที่ได้จากการกรองไปทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และนำไปชั่งน้ำหนัก

### 3.2.5 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการแยก

- 1) อุปกรณ์การกรองประกอบด้วยกรวยแยก (Separating funnel)
- 2) ขวดเก็บสารตัวอย่าง
- 3) ไทคลอโรมีเทน ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )
- 4) เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator)

ขั้นตอนในการแยกมีหลักการ คือ การใช้เทคนิคสกัดแยกด้วยตัวทำละลายในการแยกส่วนที่เป็นน้ำออกจากน้ำมัน ในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการกรองเอาของแข็งออก โดยลักษณะการแยกดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.3 ส่วนที่เป็นน้ำจะอยู่ด้านบนและส่วนที่เป็นน้ำมันจะอยู่รวมกับตัวทำละลายที่ใช้สกัดแยกอยู่ด้านล่าง (ไทคลอโรมีเทน) จากนั้นทำการแยกตัวทำละลายออกด้วยการใช้เครื่องระเหยแบบหมุนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำและน้ำมัน โดยใช้เทคนิคสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย



รูปที่ 3.4 ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแยก

### 3.2.6 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer)

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน ในตัวอย่าง ชีวมวลและน้ำมันชีวภาพ ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN-2000 ดังแสดงใน รูปที่ 3.5 ซึ่งผลการวิเคราะห์คิดเป็นร้อยละธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดโดยน้ำหนักของชีวมวลหรือ น้ำมันชีวภาพที่ทำการวิเคราะห์





รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer)

### 3.2.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลไพโรไลซิส ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

แก๊สพา (Carrier gas)	แก๊สอาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์	Unibeads C packedcolumn
อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์(Oven column temperature)	50 ถึง 180 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (Detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)

### 3.2.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-Mass spectrometry)

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)

**ตารางที่ 3.2** ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry)

แก๊สพา (carrier gas)	แก๊สฮีเลียม (He)
ชนิดคอลัมน์	DB-5 column
อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (Oven column temperature)	40 ถึง 280 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิท่อส่งผ่าน (Transfer line temperature)	220 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในการผลิตไอออน (Ion source temperature)	220 องศาเซลเซียส

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมกระถินยักษ์

บดและคัดขนาดไม้กระถินยักษ์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 ถึง 250 ไมโครเมตรด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อนขนาด 150 และ 250 ไมโครเมตร นำกระถินยักษ์ตามขนาดที่ต้องการไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมงเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการศึกษาวิจัย

#### 3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

3.3.2.1. วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) วิเคราะห์ตามมาตรฐานของ ASTM D3172-3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว

3.3.2.2. วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) โดยใช้เครื่อง CHN analysis เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

#### 3.3.3 กระบวนการลิกวิแฟกชัน

3.3.3.1 ชั่งกระถินยักษ์ 15 กรัม ผสมกับตัวทำละลาย (น้ำและน้ำมันเตา) 90 กรัม โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์ (6:1) และอัตราส่วนของตัวทำละลายระหว่างน้ำและน้ำมันเตา (0:1, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:0) ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์

3.3.3.2 ประกอบเครื่องปฏิกรณ์ทำการไล่อากาศ, แก๊สที่ค้างหรือแก๊สปนเปื้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้นอัดความดันแก๊สไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์เพื่อควบคุมให้ตัวทำละลาย (น้ำ) ยังคงสถานะของเหลวระหว่างที่ได้รับความร้อนจนถึงภาวะอุณหภูมิที่

ต้องการศึกษา (300-350 องศาเซลเซียส) ตั้งค่าความเร็วรอบของใบกวน 200 รอบต่อนาทีใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาทีโดยเริ่มนับเวลาเมื่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนด

3.3.3.3 เมื่อครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ทำการลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จนถึง 35 องศาเซลเซียส

3.3.3.4 ทำการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยถุงบรรจุแก๊สขนาด 2 ลิตร และนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

3.3.3.5 ทำการเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านชาร์ โดยการกรองแยกถ่านชาร์ด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/D และนำถ่านชาร์ที่ได้ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละของถ่านชาร์ที่ได้

3.3.3.6 ทำการแยกผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีลักษณะเป็นของผสมโดยการชะด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ซึ่งของเหลวจะแบ่งเป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นของน้ำ (ด้านบน) และชั้นของตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (ด้านล่าง) นำชั้นของตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนมาระเหยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยแยกตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมัน (น้ำมันชีวภาพและน้ำมันเตา) ที่ได้จากกระบวนการ

3.3.3.7 ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เหลือภายหลังการระเหย และนำไปคำนวณหาร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ นำผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้ไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และองค์ประกอบของน้ำมันด้วยเครื่อง CHN analyzer และ GC-MS ตามลำดับ

การศึกษากระบวนการลิกวิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์ในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและน้ำมันเตา มีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

ก. อุณหภูมิของกระบวนการลิกวิแฟกชัน (300, 350 องศาเซลเซียส )

ทำการทดลองที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 15 กรัม (สำหรับการทดลองที่กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 300 และ 350 องศาเซลเซียส) ตัวทำละลาย 90 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อไม้กระถินยักษ์ 6:1 โดยน้ำหนัก) อัตราส่วนตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ 1:0 และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

ข. อัตราส่วนตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ (0:1, 1:1, 2:1, 3:1, 1:0 โดยน้ำหนัก)

ทำการทดลองที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 15 กรัม (สำหรับการทดลองที่กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส) ตัวทำละลาย 90 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อไม้

กระถินยักษ์ 6:1 โดยน้ำหนัก) อัตราส่วนตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ (0:1, 1:1, 2:1, 3:1, 1:0 โดยน้ำหนัก) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

ค. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (30, 60 และ 90 นาที)

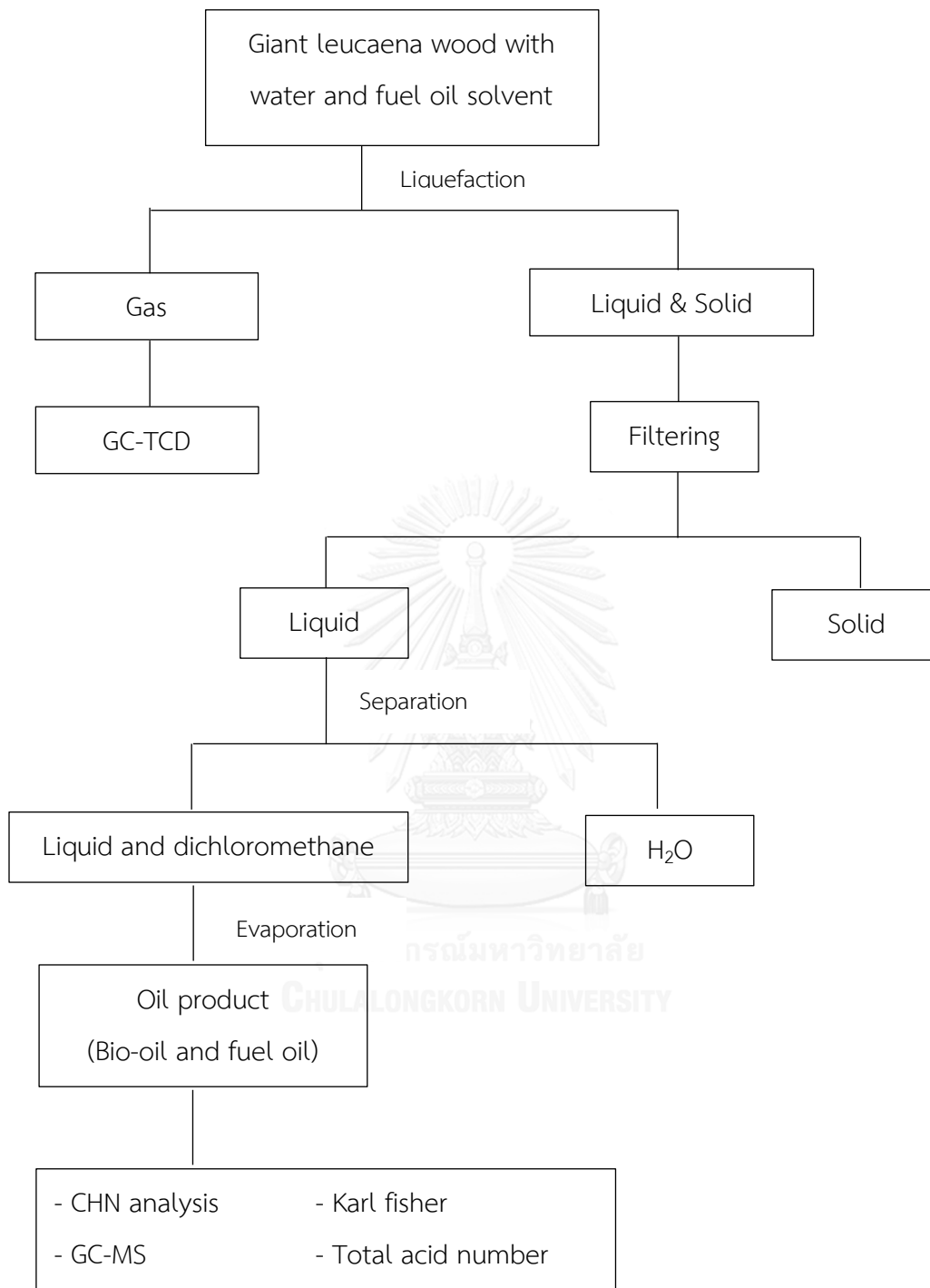
ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 15 กรัม ตัวทำละลาย 90 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อไม้กระถินยักษ์ 6:1 โดยน้ำหนัก) อัตราส่วนตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ 1:1

ง. อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์โดยน้ำหนัก (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อไม้กระถินยักษ์เท่ากับ 9 : 1 และ 6 : 1 โดยน้ำหนัก)

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 10 และ 15 กรัม ตัวทำละลาย 90 กรัม เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที และอัตราส่วนตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ 1:1

จ. ความเร็วในการกวน (200, 300, 400 รอบ/นาที)

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 15 กรัม ตัวทำละลาย 90 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อไม้กระถินยักษ์ 6:1 โดยน้ำหนัก) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ 1:1



รูปที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำรวมทั้งศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากลิควิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดำเนินการต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนตัวทำละลาย เวลาในการเกิดปฏิกิริยา อัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลาย และความเร็วในการกวน โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer) และแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) และวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองออกได้เป็น 8 ส่วน ดังนี้

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้กระถินยักษ์ได้แก่การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)
- ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA)
- ผลของอุณหภูมิในลิควิแฟกชันต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว
- ผลของตัวทำละลายผสมต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว
- ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว
- ผลของอัตราส่วนระหว่างชีวมวลและตัวทำละลายต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว
- ผลของความเร็วในการกวนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว
- ผลของการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้กระถินยักษ์และน้ำมันเตา

##### 4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อนของชีวมวล

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไม้กระถินยักษ์

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, as received <sup>a</sup> )	
ความชื้น (Moisture)	7.90
สารระเหย (Volatile matter)	74.80
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) <sup>b</sup>	14.00
เถ้า (Ash)	3.30
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, dry ash free <sup>c</sup> )	
คาร์บอน (C)	44.07
ไฮโดรเจน (H)	5.23
ไนโตรเจน (N)	0.87
ออกซิเจน (O) <sup>d</sup>	49.73
อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน	1.12
<b>ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)</b>	<b>17.11</b>

a = ร้อยละน้ำหนักโดยมวลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยตรง

b = 100 - ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว

c = ร้อยละน้ำหนักโดยมวลที่ไม่คิดค่าความชื้นและเถ้า

d = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไม้กระถินยักษ์ พบว่าไม้กระถินยักษ์มีองค์ประกอบของสารระเหยสูงถึงร้อยละ 74.80 แต่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำร้อยละ 14 อีกทั้งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบธาตุ พบว่า อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนของไม้กระถินยักษ์มีค่าเท่ากับ 1.12 ถือว่ามีค่ามากเมื่อเทียบกับชีวมวลโดยทั่วไป ซึ่งจะมีอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนมากกว่า 0.3 (Yang, Sharif et al. 2008) ดังนั้นน้ำมันชีวภาพจากกระถินยักษ์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ จึงมี



ปริมาณออกซิเจนสูงด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่าปริมาณออกซิเจนในไม้กระถินยักษ์มีสูงถึงร้อยละ 49.73 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจนร้อยละ 44.07 และ 5.23 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนพบว่าค่าความร้อนของไม้กระถินยักษ์มีค่าเท่ากับ 17.11 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

#### 4.1.2 เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้กระถินยักษ์

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของไม้กระถินยักษ์ พบว่าไม้กระถินยักษ์มีปริมาณของโฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) คือ เซลลูโลสรวมกับเฮมิเซลลูโลสมากเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น เช่น แกลบ และกะลาปาล์ม เนื่องจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสพบมากในพืชตระกูลหญ้าและไม้เนื้ออ่อน (Lehmann and Joseph 2009) สำหรับลิกนินในไม้กระถินยักษ์พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 18.568 โดยมวล ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปกติ เนื่องจากโดยทั่วไปไม้กระถินยักษ์เป็นไม้ยืนต้นซึ่งจะพบลิกนินมากที่ส่วนของแกนไม้และเปลือกไม้ ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าไม้กระถินยักษ์ที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ มีอายุน้อยจึงมีเนื้อไม้ที่อ่อนกว่า ทำให้ปริมาณลิกนินน้อยกว่าปริมาณลิกนินที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยที่ผ่านมา โดยไม้แต่ละชนิดมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีค่าความแข็งสูง และสำหรับไม้ชนิดเดียวกันแล้ว ไม้ที่มีอายุมากกว่าจะมีปริมาณลิกนินมากกว่าเช่นกัน (Blanchette 2000)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล

ชีวมวล	ปริมาณ (ร้อยละโดยมวล)			
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ
ไม้กระถินยักษ์	44.286	22.202	18.568	14.944

#### 4.13 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อนของน้ำมันเตา

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติ (Compositions) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันเตาเกรด A พบว่า น้ำมันเตามีจุดเดือดประมาณ 370-420 องศาเซลเซียส และมีความหนืดที่ไม่สูงมากประมาณ 75.13 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในลิควิแพกชัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่าน้ำมันเตามีปริมาณคาร์บอน

และไฮโดรเจนที่สูงร้อยละ 80.37 และ 11.38 ตามลำดับ และมีปริมาณออกซิเจนร้อยละ 6.18 ในส่วนของปริมาณซัลเฟอร์มีค่าร้อยละ 1.79 ซึ่งถือว่าค่าที่ไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเตาเกรดอื่นๆ (Waffleice 2548) จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนพบว่าค่าความร้อนของน้ำมันเตามีค่าเท่ากับ 42.49 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

**ตารางที่ 4.3** ผลการวิเคราะห์สมบัติ (Compositions) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันเตาเกรด A

<b>องค์ประกอบทางกายภาพ<sup>a</sup></b>	
จุดเดือด (Boiling point, °C)	370 - 420
ความหนืด (Viscosity at 50 °C, mm <sup>2</sup> /s)	75.13
จุดวาบไฟ (Flash point, °C)	77.03
จุดไหลเท (Pour point, °C)	-3
เถ้า (Ash content, wt.%)	0.013
<b>การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ<sup>b</sup> (ร้อยละโดยน้ำหนัก, as basis)</b>	
คาร์บอน (C)	80.37
ไฮโดรเจน (H)	11.38
ไนโตรเจน (N)	0.28
ออกซิเจน (O) <sup>c</sup>	6.18
ซัลเฟอร์ (S)	1.79
<b>ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)<sup>d</sup></b>	
	42.49

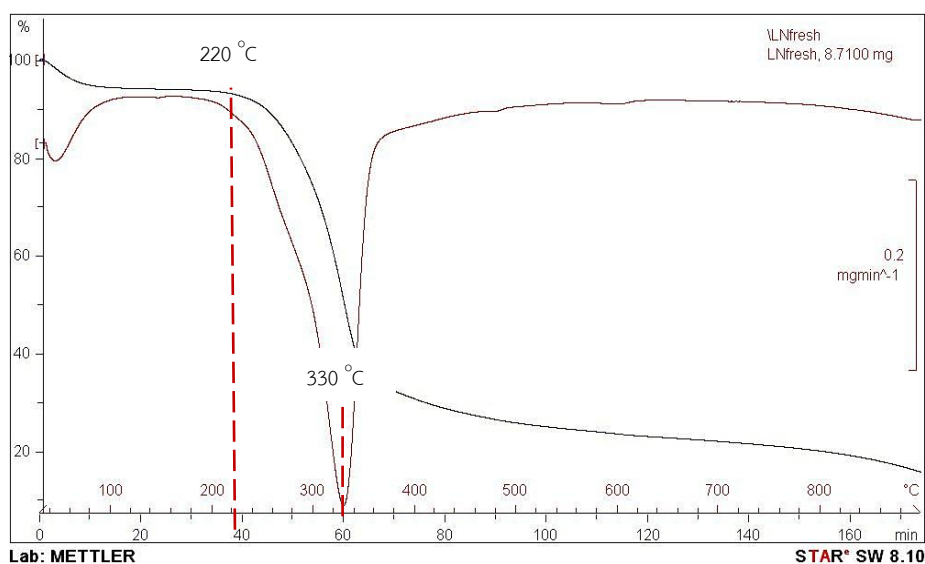
a, b = ข้อมูลจากบริษัทศรีวิภากรู๊ป จำกัด

c = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

d = คำนวณจากสูตรของคูลอง, ค่าความร้อน (เมกะจูล / กิโลกรัม) =  $0.338C + 1.428(H - O/8) + 0.0955S$

## 4.2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA) ภายใต้ไนโตรเจน ที่ช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 900 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า กระถินยักษ์เริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 220 องศาเซลเซียส และมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 330 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์ ทำให้ทราบช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษา โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอุณหภูมิของลิกวิแพกซ์ในช่วง 300 - 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์  
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA

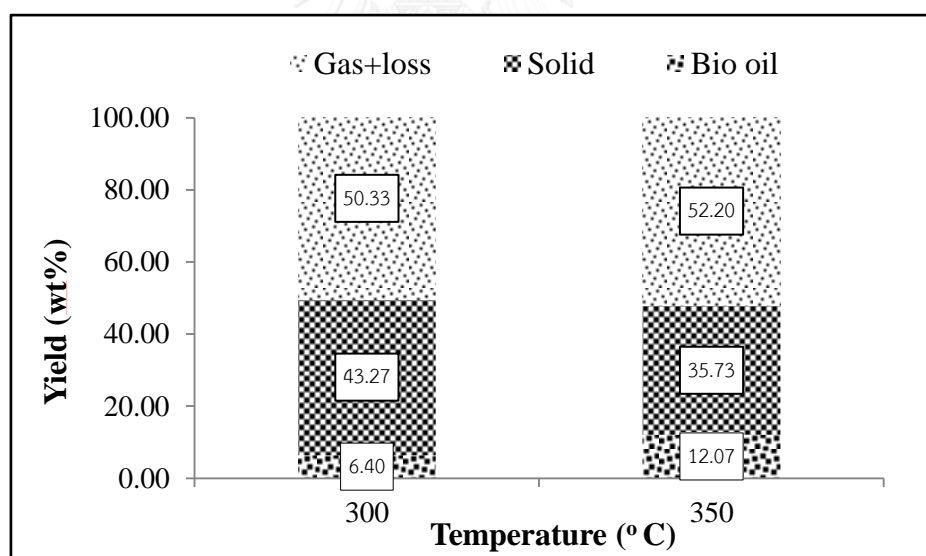
ในงานวิจัยนี้สนใจการผลิตน้ำมันชีวภาพรวมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากผลของภาวการณ์ทดลองที่แตกต่างกัน การคำนวณผลิตภัณฑ์ส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

- น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) คำนวณจากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมัน (Oil product) ที่ได้ หลังจากการระเหยตัวทำละลายออกกลับด้วยน้ำหนักของน้ำมันเตาส่วนด้วยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์เริ่มต้น
- ของแข็งส่วนเหลือ (Solid residue) คำนวณจากน้ำหนักของของแข็งที่ได้หลังจากการระเหย ความชื้นส่วนด้วยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์เริ่มต้น
- ผลิตภัณฑ์แก๊สและส่วนที่หาย (Gas + Loss) คำนวณจาก 100 ลบออกด้วยน้ำมันชีวภาพ และของแข็ง

### 4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลิกวิแฟกชัน

ที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ไม้กระถินยักษ์ 15 กรัม และตัวทำละลายน้ำมันเตา 90 กรัม

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากลิกวิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์ที่ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 300 เป็น 350 องศาเซลเซียสนั้น ทำให้ปริมาณของน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเท่ากับ 6.40 และ 12.07 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และยังพบว่าทำให้ปริมาณของแข็งและแก๊สลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะทำให้ชีวมวลมีการสลายตัวไปเป็นน้ำมันได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ TGA ของไม้กระถินยักษ์จะพบว่าไม้กระถินยักษ์จะมีการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส สำหรับผลิตภัณฑ์ของแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจากร้อยละ 43.27 เป็น 35.73 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกตัวของของแข็งมากขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแก๊สมากขึ้นทั้งในส่วนที่สามารถควบแน่นได้ (น้ำมันชีวภาพ) และส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Xu, Wang et al. 2009)



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชัน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากผลของอุณหภูมิในกระบวนการลิกวิแฟกชันมาทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนแสดงผลการทดลองได้ในตารางที่ 4.4 พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่าที่ร้อยละ 85.16 และ 12.27 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ รวมทั้งมีปริมาณของออกซิเจนต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

มีค่าร้อยละ 1.54 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดพวกปฏิกิริยากำจัดออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งได้แก่ ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชัน (Decarbonylation) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) แสดงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยทั้งสองเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Qu, Wei et al. 2003) ทำให้ที่อุณหภูมิสูงชีวมวลเกิดปฏิกิริยากำจัดออกซิเจนได้ดีกว่า ส่งผลทำให้ปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันมีแนวโน้มลดลงและปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนเท่ากับ 47.85 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของน้ำมันจากฟอสซิล (Miao and Wu 2004)

**ตารางที่ 4.4** ผลของอุณหภูมิต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

องค์ประกอบ	น้ำมันเตา เกรด A <sup>a</sup>	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		น้ำมันฟอสซิล <sup>b</sup>
		300	350	
ความเป็นกรด (mg KOH/g)	9.02	6.93	9.87	—
ปริมาณน้ำ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.10	0.17	0.21	Max 1
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
คาร์บอน	80.37	83.11	85.16	83.0-87.0
ไฮโดรเจน	11.38	11.32	12.27	10.0-14.0
ไนโตรเจน	0.28	0.37	0.21	0.01-0.7
ออกซิเจน <sup>c</sup>	6.18	5.20	1.54	0.05-1.5
ซัลเฟอร์ <sup>d</sup>	1.79	1.10	0.82	0.05-5.0
ค่าความร้อน <sup>e</sup> (เมกะจูล/ กิโลกรัม)	42.49	43.68	47.85	45

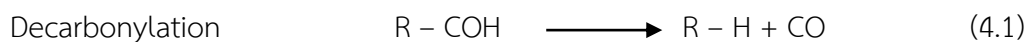
a = ข้อมูลจากบริษัทศรีวรากรูป จำกัด

b = ข้อมูลจาก Miao XL, Biotechnoly 2004:110(1):85-93.

c = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

d = คำนวณพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง GC-FPD

e = คำนวณจากสูตรของคูลอง, ค่าความร้อน (เมกะจูล / กิโลกรัม) =  $0.338C + 1.428(H-O/8) + 0.0955$



ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากอุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวว่ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิวเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

Temperature (°C)	Gas composition (mol)			
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
300	0.178	0.374	2.522	5.690
350	0.565	2.840	3.446	6.833

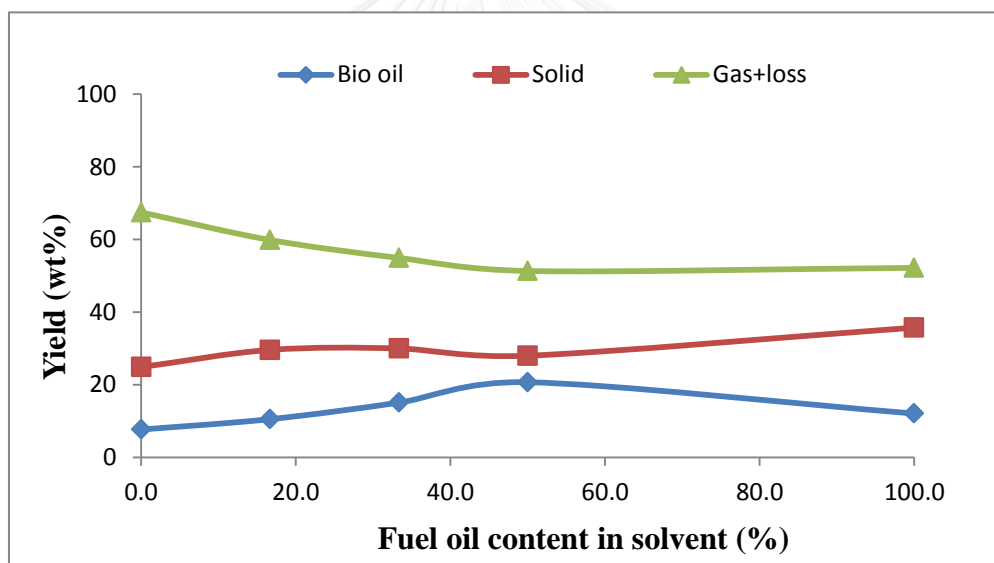
เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองโดยรวมสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมัน คือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่สูงรวมทั้งมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังนั้นเราจึงใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสทำการทดลองต่อไป

#### 4.4 ผลของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำที่มีต่อลิควิแฟกชัน

ที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ไม้กระถินยักษ์ 15 กรัม อัตราส่วนซีมวลต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 6 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายผสมร้อยละ 0, 16.7, 33.3, 50 และ 100 (อัตราส่วนของตัวทำละลายระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ 0:1, 1:3, 1:2, 1:1 และ 1:0)

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำในกระบวนการลิควิแฟกชัน เมื่อเปรียบเทียบที่ตัวทำละลายเพียงอย่างเดียวของน้ำและน้ำมัน (ปริมาณของน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 0 และ 100) พบว่าการใช้ตัวทำละลายน้ำมันเตาให้ค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันสูงกว่าตัวทำละลายน้ำ โดยมีค่าร้อยละ 12.07 โดยน้ำหนัก เนื่องจากน้ำมันเตาสามารถสกัดส่วนที่ไม่มีขั้วออกมาจากชีวมวลได้มากกว่าการใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Song, Hu et al. 2014) นอกจากนั้นเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย น้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งจะแตกตัว

เป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ที่มีความสามารถในการแตกตัวและสลายโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันและชีวมวล ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเกิดการแตกตัวกลายเป็นแก๊สมากขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันและของแข็งลดลง (Liu, Yuan et al. 2013) ส่วนผลของตัวทำละลายผสมพบว่าที่ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายผสมร้อยละ 50 (อัตราส่วนตัวทำละลาย 1:1) พบว่าให้ค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ร้อยละ 20.70 โดยน้ำหนัก เนื่องจากน้ำมันเตาเข้าไปช่วยลดความสามารถในการแตกตัวของน้ำไม่ให้ผลิตภัณฑ์กลายเป็นแก๊ส ส่วนน้ำจะทำหน้าที่ให้ไฮโดรเจนแอกอนูมอลอิสระ (Free radical) ที่เกิดจากการสลายตัวของชีวมวล จึงทำให้อนุมอลอิสระเกิดความเสถียรกลายเป็นน้ำมัน (Yuan, Li et al. 2007, Liu, Yuan et al. 2013) และยังพบว่าปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายผสมร้อยละ 50 ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็นผลอาจจะเนื่องมาจากภาวะที่เหมาะสมส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองคือปฏิกิริยารีพอลิเมอไรเซชัน (Repolymerization) ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้เกิดเป็นของเหลวและของแข็ง (Pütün 2010)



รูปที่ 4.3 ผลของตัวทำละลายผสมต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชัน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากผลของตัวทำละลายผสมไปทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ วิเคราะห์แบบแยกธาตุและวิเคราะห์ค่าความร้อนแสดงผลการทดลองได้ในตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาที่ปริมาณน้ำ (Water content) ในผลิตภัณฑ์น้ำมัน พบว่าปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำในตัวทำละลาย โดยมีค่าปริมาณน้ำสูงสุดร้อยละ 0.53 โดยน้ำหนัก ที่

ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 0 และมีค่าต่ำสุดร้อยละ 0.21 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 100 เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำจะพบได้จาก น้ำที่เป็นตัวทำละลาย ความชื้นในชีวมวลรวมทั้งอยู่ในองค์ประกอบของชีวมวลที่เป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยอยู่ในรูปของหมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) ที่เป็นพวกแอลกอฮอล์ (Alcohol) ซึ่งเมื่อถูกความร้อน จะเกิดการสลายตัวออกมาและไปรวมตัวกับโมเลกุลอื่นๆ กลายเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยสามารถยืนยันได้จากผลของ GC/MS ในตารางที่ 4.7 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ไม่ได้เติมชีวมวลที่ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 50 และ 100 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 50 มีสารประกอบในกลุ่มแอลกอฮอล์เกิดขึ้น ได้แก่ Benzenediol, Phenol เป็นต้น แสดงให้เห็นได้ว่าปริมาณน้ำของผลิตภัณฑ์น้ำมันนอกจากจะมาจากองค์ประกอบของชีวมวลแล้ว ยังรวมถึงน้ำที่เป็นตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการ

ในส่วนของการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่าปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในแต่ละอัตราส่วนของตัวทำละลายไม่แตกต่างกันมากนัก ปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันพบว่ามีความเพิ่มขึ้นเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลายผสมโดยมีปริมาณออกซิเจนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 19.61 โดยน้ำหนัก (ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 0) ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากออกซิเจนของน้ำที่เป็นตัวทำละลายเข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับโมเลกุลของชีวมวลกลายเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน (Cheng, D'cruz et al. 2010) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากตัวทำละลายในแต่ละอัตราส่วนดังตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลายผสมจะส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากออกซิเจนบางส่วนของน้ำเกิดปฏิกิริยาหายไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ในส่วนค่าปริมาณซัลเฟอร์ในผลิตภัณฑ์น้ำมัน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเตาที่ยังไม่ได้ผ่านปฏิกิริยาในกระบวนการ (น้ำมันเตาเกรด A) ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณซัลเฟอร์ลดลง อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากซัลเฟอร์ในน้ำมันเตาเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มาจากน้ำและชีวมวลกลายเป็นซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sulfur oxide) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) (Alif, Matsumoto et al. 2013, Kang, Li et al. 2013)

ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากผลของตัวทำละลายผสม พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 32 - 46 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมีค่าความร้อนลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำในตัวทำละลาย เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยมีค่าความร้อนสูงสุดที่ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 100 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันจากฟอสซิล (Miao and Wu 2004) โดยน้ำมันจากฟอสซิลจะมีค่าความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 42- 47 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เมื่อพิจารณาผลของตัวทำละลายผสมโดยรวมสรุปได้ว่าที่ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุด รวมถึงคุณสมบัติของน้ำมันที่ดี เราจึงเลือกใช้ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในการทดลองต่อไป



ตารางที่ 4.6 ผลของตัวทำละลายผสมต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบ	น้ำมันเตา เกรด A <sup>a</sup>	ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลาย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
		0	16.7	33.3	50	100
ความเป็นกรด (mg KOH/g)	9.02	7.76	12.23	10.54	11.55	9.87
ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำโดยน้ำหนัก)	0.10	0.53	0.43	0.52	0.34	0.21
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
คาร์บอน	80.37	71.54	74.62	76.98	77.88	85.16
ไฮโดรเจน	11.38	8.07	9.94	10.82	11.03	12.27
ไนโตรเจน	0.28	0.77	0.16	0.22	0.33	0.21
ออกซิเจน <sup>b</sup>	6.18	19.61	14.96	11.64	10.51	1.54
ซัลเฟอร์ <sup>c</sup>	1.79	-	0.32	0.34	0.25	0.82
ค่าความร้อน <sup>d</sup> (เมกะจูล/กิโลกรัม)	42.49	32.30	36.88	39.55	40.36	46.23

a = ข้อมูลจากบริษัทศรีวิราชกรุ๊ป จำกัด

b = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

c = คำนวณพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง GC-FPD

d = คำนวณจากสูตรของคูลอง, ค่าความร้อน (เมกะจูล / กิโลกรัม) =  $0.338C + 1.428(H-O/8) + 0.0955$

ตารางที่ 4.7 สารประกอบในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ไม่ได้เติมชีวมวลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS

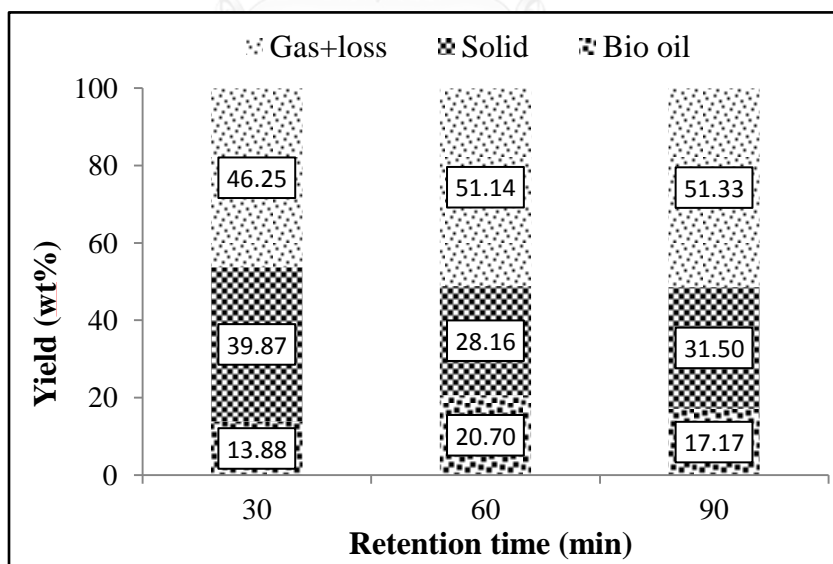
Ret.Time	Name Oxygenated compounds	Mol.Form	%Area	
			Fuel oil content in solvent (wt.%)	
			100	50
11.183	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	3.11	2.30
11.300	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	2.83	2.08
12.417	Benzene,1,4-diethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	2.50	-
12.925	Benzene,2-ethyl-1,4-dimethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	-	1.41
13.167	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	4.62	5.17
14.424	Undecane,2-methyl-	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	1.92	1.78
14.608	1,2-Benzenediol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	-	4.64
14.683	Phenol,2-methoxy-4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-	4.46
14.717	Naphthalene	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	4.66	4.66
14.825	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	7.17	6.24
15.633	1,2-Benzenediol,3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-	1.87
16.325	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	7.11	6.22
16.433	Napthalene,1-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	3.61	3.48
16.808	1,3-Benzenediol,4-ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-	1.59
17.287	Phenol,2-methoxy-4-propyl	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	-	1.21
17.383	Hexadecane,2,6,10,14-tetramethyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	1.23	1.02
18.158	Napthalene,1,2-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	1.36	1.52
18.517	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	1.26	1.02
18.642	1,3-Benzenediol,4-prppyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-	1.25
20.275	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	5.79	-
21.467	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	-	5.43
22.867	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	3.54	3.33

ตารางที่ 4.8 ผลของตัวทำละลายผสมต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

Fuel oil content in solvent (%)	Gas composition (mol)			
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
0	0.875	1.483	0.517	14.08
16.7	0.889	2.402	1.657	12.424
33.3	0.767	1.884	1.771	11.105
50	1.399	1.287	2.341	12.653
100	0.564	3.446	2.84	6.832

#### 4.5 ผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อลิกวิแฟกชัน

ที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ไม้กระถินยักษ์ 15 กรัม อัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 6 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30, 60 และ 90 นาที อัตราส่วนของตัวทำละลายระหว่างน้ำมันเตาและน้ำเท่ากับ 1:1



รูปที่ 4.4 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชัน

ผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการลิควิแฟชัน แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากชีวมวลมีระยะเวลาในการสลายตัวไปเป็นน้ำมันชีวภาพมากขึ้น รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง คือ การเกิดรีพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของโมเลกุลกลายเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันและของแข็งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 90 นาที พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีค่าลดลง และของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่นานขึ้น ส่งผลให้น้ำมันชีวภาพที่ได้ เกิดการแตกตัวกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น รวมทั้งผลิตภัณฑ์น้ำมันบางส่วนอาจเกิดการรีพอลิเมอไรเซชันกลายเป็นของแข็ง (Pütün 2010) ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของของแข็งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.9 ผลของระยะเวลาต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

องค์ประกอบ	น้ำมันเตา เกรด A <sup>a</sup>	ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา (นาที)		
		30	60	90
ความเป็นกรด (mg KOH/g)	9.02	10.43	11.55	11.80
ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.10	0.29	0.34	0.35
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
คาร์บอน	80.37	76.35	77.88	77.37
ไฮโดรเจน	11.38	11.94	11.03	12.79
ไนโตรเจน	0.28	0.50	0.33	0.42
ออกซิเจน <sup>b</sup>	6.18	10.87	10.51	9.23
ซัลเฟอร์ <sup>c</sup>	1.79	0.34	0.25	0.20
ค่าความร้อน <sup>d</sup> (เมกะจูล/ กิโลกรัม)	42.49	41.09	40.36	40.45

a = ข้อมูลจากบริษัทศรีวรากรูป จำกัด

b = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

c = คำนวณพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง GC-FPD

d = คำนวณจากสูตรของตูลอง, ค่าความร้อน (เมกะจูล / กิโลกรัม) =  $0.338C + 1.428(H - O/8) + 0.0955S$

เมื่อนำผลของระยะเวลาไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนแสดงผลการทดลองได้ในตารางที่ 4.9 พบว่าสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่สังเกตได้ว่าออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลา 90 นาที มีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจจะมาจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาในการขจัดน้ำมันสามารถเกิดได้นานขึ้น ส่งผลให้ค่าออกซิเจนในน้ำมันลดลง ส่วนค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงประมาณ 40-41 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อนที่ได้มีค่าต่ำกว่าน้ำมันเตาเกรด A เล็กน้อย แต่ยังมีค่าต่ำกว่าน้ำมันจากฟอสซิลอยู่มาก (มีค่าประมาณ 44-47 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) (Miao and Wu 2004)

ตารางที่ 4.10 ผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

Retention time (minute)	Gas composition (mol)			
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
30	0.796	1.091	2.370	13.837
60	1.399	1.287	2.341	12.653
90	0.886	1.381	2.564	15.124

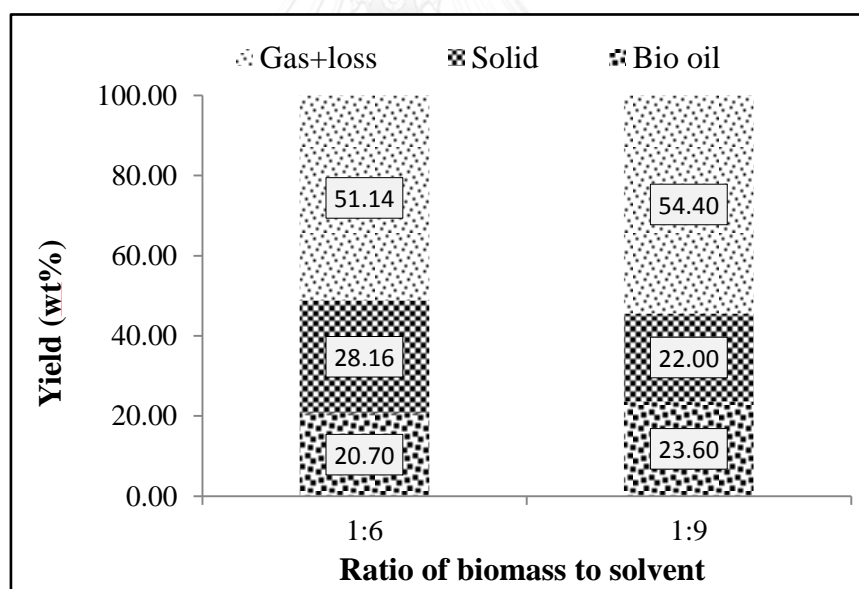
ตารางที่ 4.10 แสดงผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการลิกวิแฟกชันพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยากำจัดออกซิเจนที่เกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาตีคาร์บอนิวเลชันและปฏิกิริยาตีคาร์บอกซิเลชัน สามารถเกิดได้นานขึ้น ส่งผลให้ออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันถูกกำจัดได้มากขึ้น กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์

ดังนั้นสรุปได้ว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในลิกวิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์คือ 60 นาที เนื่องจากให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่สูงที่สุด รวมทั้งมีสมบัติและองค์ประกอบทางกายภาพที่ดีและใกล้เคียงกับภาวะอื่นๆ

#### 4.6 ผลของอัตราส่วนระหว่างชีวมวลต่อตัวทำละลายที่มีต่อกระบวนการลิกวิแฟกชัน

ที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1:6 และ 1:9 ตัวทำละลาย 90 กรัม เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที อัตราส่วนของตัวทำละลายระหว่างน้ำมันเตาและน้ำเท่ากับ 1:1

รูปที่ 4.5 แสดงผลของอัตราส่วนของชีวมวลต่อตัวทำละลายในกระบวนการลิกวิแฟกชันของไม้กระถินยักษ์ พบว่าที่อัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1:9 ให้คาร์บอนละลายได้ของผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่า 1:6 โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 20.70 และ 23.60 โดยน้ำหนัก และยังพบว่าที่อัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลาย 1:9 ของแข็งที่ได้มีปริมาณน้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อใส่ชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ในปริมาณที่น้อยลง จะทำให้ตัวทำละลายสามารถผสมกับชีวมวลได้ดีขึ้น นอกจากนี้ที่อัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลาย 1:9 น้ำและน้ำมันเตาสามารถให้ไฮดรอกไซด์ไอออนและไฮโดรเจนที่เพียงพอในการสลายและการเกิดปฏิกิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน (Qu, Wei et al. 2003) ซึ่งส่งผลทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันเพิ่มขึ้น และมีของแข็งคงเหลือลดลง



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลายต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

เมื่อนำผลของอัตราส่วนของชีวมวลต่อตัวทำละลายไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันแสดงผลการทดลองได้ในตารางที่ 4.11 พบว่าสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าอัตราส่วนของชีวมวลต่อตัวทำละลายไม่ส่งผลต่อสมบัติ

ทางกายภาพมากนัก ส่วนค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าประมาณ 40 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลายส่งผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ โดยที่อัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1:9 ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงสุด

**ตารางที่ 4.11** ผลของอัตราส่วนชีวมวลต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

องค์ประกอบ	น้ำมันเตาเกรด A <sup>a</sup>	อัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลาย	
		1:6	1:9
ความเป็นกรด (mg KOH/g)	9.02	11.55	10.03
ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.10	0.34	0.25
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
คาร์บอน	80.37	77.88	76.35
ไฮโดรเจน	11.38	11.03	11.84
ไนโตรเจน	0.28	0.33	0.51
ออกซิเจน <sup>b</sup>	6.18	10.51	10.93
ซัลเฟอร์ <sup>c</sup>	1.79	0.25	0.37
ค่าความร้อน <sup>d</sup> (เมกะจูล/ กิโลกรัม)	42.49	40.36	40.93

a = ข้อมูลจากบริษัทศรีวิภากรู๊ป จำกัด

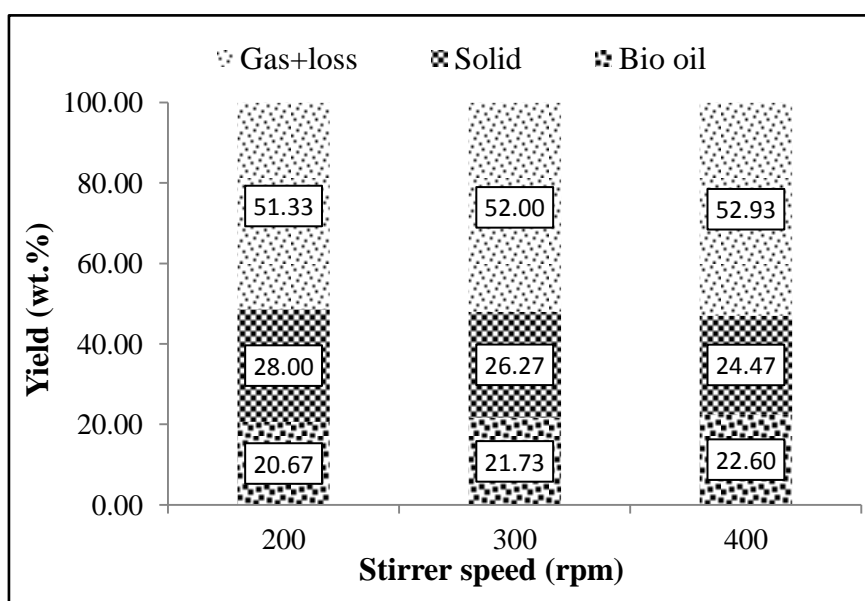
b = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

c = คำนวณพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง GC-FPD

d = คำนวณจากสูตรของคูลอง, ค่าความร้อน (เมกะจูล / กิโลกรัม) =  $0.338C + 1.428(H-O/8) + 0.0955$

#### 4.7 ผลของความเร็วในการกวนที่มีต่อกระบวนการลิกวิแฟกชัน

ที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ไม้กระถินยักษ์ 15 กรัม อัตราส่วนซีมวลต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 6 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที อัตราส่วนของตัวทำละลายระหว่างน้ำมันเตาและน้ำเท่ากับ 1:1 ความเร็วรอบสกรู 200, 300 และ 400 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.6 ผลของความเร็วในการกวนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลความเร็วในการกวนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันในกระบวนการลิกวิแฟกชันแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการกวนจาก 200 ไปถึง 400 รอบต่อนาที จะทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อความเร็วในการกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้ชีวมวลมีการผสมกับตัวทำละลายได้ดีรวมทั้งทำให้ชีวมวลได้รับความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ทั่วถึง ส่งผลให้ชีวมวลสลายตัวและเกิดปฏิกิริยาหายไปเป็นน้ำมันได้มากขึ้น และทำให้ปริมาณของแข็งลดลงด้วย

เมื่อนำผลของความเร็วในการกวนไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันแสดงผลการทดลองได้ในตารางที่ 4.12 พบว่าสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าความเร็วในการกวนไม่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ส่วนค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ความเร็วในการกวน 200, 300 และ 400 รอบต่อนาที มีค่าเท่ากับ 40.36, 40.11 และ 40.71 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ



จากผลของความเร็วในการกวนสรุปได้ว่า ความเร็วในการกวนส่งผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยความเร็วในการกวนที่ 400 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงที่สุด

**ตารางที่ 4.12** ผลของความเร็วในการกวนต่อการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

องค์ประกอบ	น้ำมันเตา เกรด A <sup>a</sup>	ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)		
		200	300	400
ความเป็นกรด (mg KOH/g)	9.02	11.55	10.20	10.97
ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.10	0.34	0.33	0.36
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
คาร์บอน	80.37	77.88	77.69	78.43
ไฮโดรเจน	11.38	11.03	10.93	11.07
ไนโตรเจน	0.28	0.33	0.46	0.35
ออกซิเจน <sup>b</sup>	6.18	10.51	10.70	9.89
ซัลเฟอร์ <sup>c</sup>	1.79	0.25	0.22	0.26
ค่าความร้อน <sup>d</sup> (เมกะจูล/ กิโลกรัม)	42.49	40.36	40.11	40.71

a = ข้อมูลจากบริษัทศรีวิภากรูป จำกัด

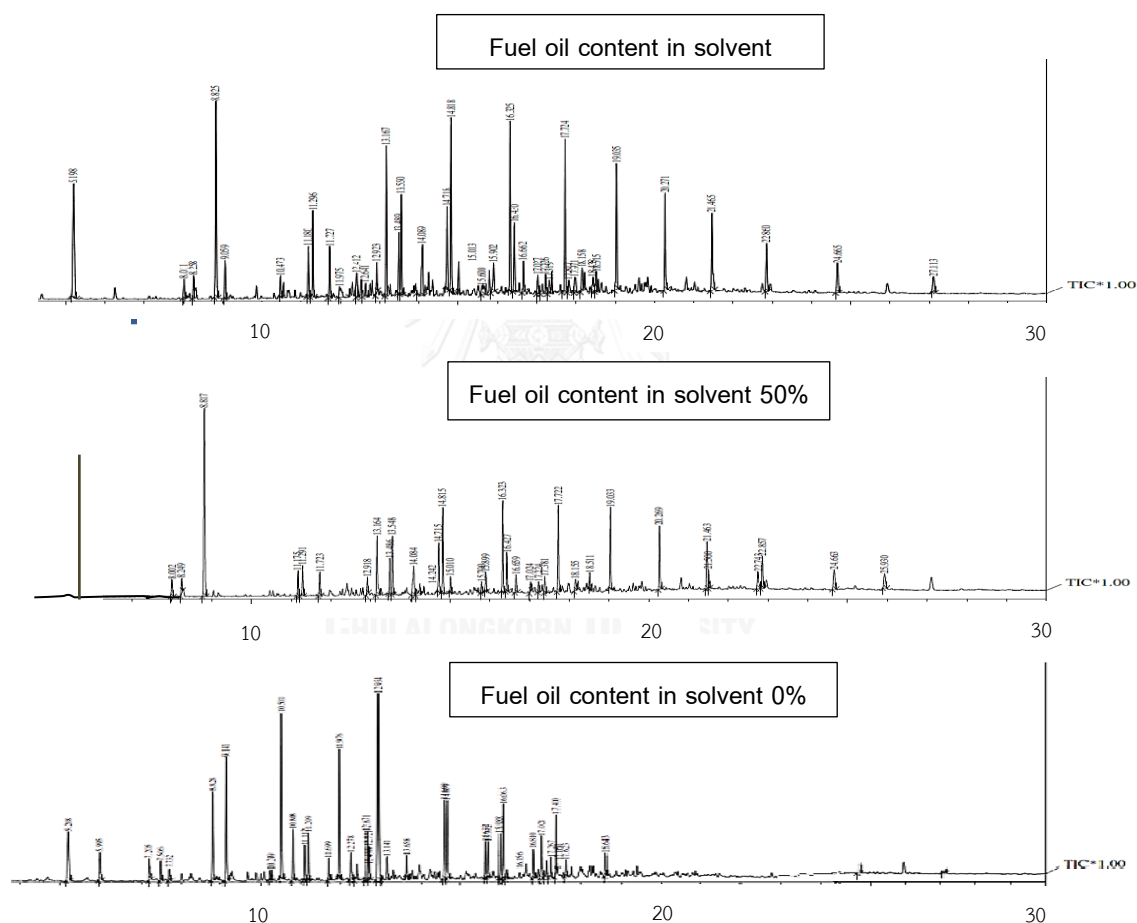
b = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

c = คำนวณพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง GC-FPD

d = คำนวณจากสูตรของตูลอง, ค่าความร้อน (เมกะจูล / กิโลกรัม) =  $0.338C + 1.428(H - O/8) + 0.0955$

#### 4.8 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)

ทำการศึกษาลักษณะขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันในกระบวนการลิควิแฟกชันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ที่ได้จากภาวะความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ไม้กระถินยักษ์ 15 กรัม อัตราส่วนซีมวลต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 6 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณตัวทำละลายน้ำมันเตาและน้ำเท่ากับ 0, 50 และ 100 ตามลำดับ ความเร็วรอบสกรู 200 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.7 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากกระบวนการลิควิแฟกชัน

ตารางที่ 4.13 สารประกอบในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS

No.	RT(min)	Fuel oil content in solvent (area%)			Compound name
		0	50	100	
1	7.20	1.57	-	-	2-Cyclopenten-1-one
2	7.50	1.26	-	-	Cyclopentanone, 2-methyl
3	8.82	5.41	4.60	8.70	Styrene
4	9.14	6.95	-	-	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl
5	10.50	8.80	-	-	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl
6	10.80	2.80	-	-	Phenol
7	11.72	-	1.52	2.07	Benzene, 1,2,3-trimethyl
8	11.97	6.05	-	-	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl
9	12.93	10.86	-	-	Phenol, 2-methoxy
10	13.16	-	4.18	5.35	Undecane
11	13.65	1.06	-	-	Cyclohexanone, 3-ethenyl
12	14.60	4.64	-	-	1,2-Benzenediol
13	14.61	4.32	4.64	-	1,2-Benzenediol
14	14.81	-	5.21	6.35	Dodecane
15	15.63	1.46	1.87	-	1,2-Benzenediol,3-methyl-
16	16.06	4.16	-	-	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy
17	16.32	-	5.29	5.67	Tridecane
18	17.02	2.69	0.56	-	2-Hexyl-1-octanol
19	17.40	2.62	-	-	1,3-Benzenediol, 4-ethyl
20	17.72	-	5.48	5.65	Tetradecane
21	18.64	1.02	1.25	-	1,3-Benzenediol,4-prppyl-
22	19.03	-	4.42	4.68	Pentadecane
23	20.26	-	3.94	3.38	Hexadecane
24	21.46	-	5.43	-	Nonadecane
25	22.86	-	3.33	3.54	Octadecane

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อัตราส่วนตัวทำละลายแตกต่างกันในกระบวนการลิควิแฟกชัน แสดงดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.13 พบว่าทั้งสามภาวะ (อัตราส่วนน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 100, 50 และ 0 ตามลำดับ) มีองค์ประกอบในกลุ่มแอโรมาติก (Aromatic)

คือ ไซลีน (Xylene) และสไตรีน (Styrene) เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมัน ซึ่งมาจากชีวมวลที่เกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนกลายเป็นโมเลกุลเล็กๆ หรือสายโซ่สั้นพวกหมู่แอลคิล (Alkyl group) และไปทำปฏิกิริยากับเบนซีน (Benzene) ที่มาจากตัวทำละลายน้ำมันเตา ทำให้เกิดสารประกอบไซลีนและสไตรีน (Kebelmann, Hornung et al. 2013)

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 100 (น้ำมันเตาเพียงอย่างเดียว) พบว่ามีองค์ประกอบพวกแอโรมาติกและแอลิฟาติกเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น Undecane, Dodecane และ Tridecane ซึ่งมาจากการสลายตัวของตัวทำละลายน้ำมันเตาบางส่วน ที่ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 0 (น้ำเพียงอย่างเดียว) สารประกอบหลักในผลิตภัณฑ์น้ำมันจะได้แก่ สารประกอบไซคลิก (Cyclic compound) ฟีนอล (Phenolic compound) และคีโตน (Ketone) ซึ่งมาจากการย่อยสลายของชีวมวล ส่วนฟีนอลและแอลกอฮอล์มาจากตัวทำละลายน้ำทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์น้ำมัน

ในส่วนตัวทำละลายผสมน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 50 พบว่ามีองค์ประกอบหลักใกล้เคียงกับตัวทำละลายน้ำมันเตาเพียงอย่างเดียว โดยมีกลุ่มของแอโรมาติกและแอลิฟาติกเป็นองค์ประกอบหลัก และมีสารประกอบในกลุ่มแอลกอฮอล์ที่มาจากปฏิกิริยาของน้ำเกิดขึ้น เช่น 2-hexyl-1-octanol, 1,2-Benzenediol เป็นต้น แต่ไม่พบสารประกอบไซคลิกและฟีนอลเหมือนกับตัวทำละลายน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าน้ำมันเตาอาจจะมีคุณสมบัติในการยับยั้งปฏิกิริยาขั้นที่สองระหว่างน้ำและผลิตภัณฑ์น้ำมัน ทำให้สารประกอบพวกไซคลิกและฟีนอลลดลง และผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นกว่าการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพียงอย่างเดียว

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลิควิแพกซ์ของไม้กระถินยักษ์ในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ และหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 60 และ 90 นาที, ปริมาณน้ำมันเตาในตัวทำละลายผสมร้อยละ 0, 16.7, 33.3, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก (อัตราส่วนของตัวทำละลายระหว่างน้ำมันเตาและน้ำ 0:1, 1:3, 1:2, 1:1 และ 1:0) ความเร็วในการกวน 200 300 400 รอบต่อนาที และอัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลาย 1:6 และ 1:9 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลิควิแพกซ์

เมื่ออุณหภูมิจากกระบวนการลิควิแพกซ์เพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 350 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น และปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลดลง ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมันคือ 350 องศาเซลเซียส

##### 5.1.2 ผลของตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำมันเตาและน้ำที่มีต่อลิควิแพกซ์

เมื่อใช้ตัวทำละลายผสมที่ตัวทำละลายเพียงชนิดเดียวของน้ำและน้ำมัน (ปริมาณของน้ำมันเตาในตัวทำละลายร้อยละ 0 และ 100) การใช้ตัวทำละลายน้ำมันเตาให้ค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันสูงกว่าตัวทำละลายน้ำ ส่วนที่ตัวทำละลายผสมที่ปริมาณน้ำมันเตาร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุด และมีสมบัติทางกายภาพที่ดี ดังนั้นผลของตัวทำละลายที่เหมาะสมคือ ปริมาณน้ำมันเตาร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

##### 5.1.3 ผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อลิควิแพกซ์

เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 90 นาที ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพลดลง ดังนั้นระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

#### 5.1.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างชีวมวลต่อตัวทำละลายที่มีต่อกระบวนการลิกวิแฟกชัน

อัตราส่วนของชีวมวลต่อตัวทำละลาย 1:9 ให้อัตราผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่สูงกว่าอัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลาย 1:6 ดังนั้นอัตราส่วนชีวมวลต่อตัวทำละลายที่เหมาะสม คือ 1:9

#### 5.1.5 ผลของความเร็วในการกวนที่มีต่อกระบวนการลิกวิแฟกชัน

เมื่อเพิ่มความเร็วในการกวนจาก 200 เป็น 400 รอบต่อนาที จะทำให้อัตราผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นความเร็วในการกวนที่เหมาะสม คือ ความเร็วในการกวน 400 รอบต่อนาที

#### 5.1.6 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ปริมาณน้ำมันเตาร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก (น้ำมันเตาเพียงชนิดเดียว) องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์น้ำมัน คือ อะลิฟาติกและแอโรมาติก ปริมาณน้ำมันเตาร้อยละ 0 (ตัวทำละลายน้ำเพียงชนิดเดียว) องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์น้ำมัน คือ สารประกอบไซคลิก ฟีนอล และคีโตน และปริมาณน้ำมันเตาร้อยละ 50 (ตัวทำละลายผสม) องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์น้ำมัน คือ อะลิฟาติก แอโรมาติก และแอลกอฮอล์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากความรู้ที่ได้ในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการผลิตน้ำมันชีวภาพ จากการใช้ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและการใช้ตัวทำละลายผสม แต่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น

- ศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติม ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อน้ำมันชีวภาพ
- ศึกษาวิธีการลดองค์ประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพที่ได้
- ศึกษาการใช้ตัวทำละลายที่เป็นตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ หรือตัวทำละลายที่มีจุดเดือดสูง มีราคาถูก สามารถหาได้ง่าย



## รายการอ้างอิง

Alif, M. F., et al. (2013). "Analysis of S-containing compounds from the hydrothermal reaction of durian wastes by ICP–OES and HPLC–SEC/TOF-MS." Microchemical Journal **108**: 68-73.

Banks, S. W., et al. (2014). "Fast pyrolysis processing of surfactant washed Miscanthus." Fuel Processing Technology **128**: 94-103.

Blanchette, R. A. (2000). "A review of microbial deterioration found in archaeological wood from different environments." International Biodeterioration & Biodegradation **46**(189-204): 189-204.

Boonjing, W. and S. Asavasrivorakul (2006). "Fuel Oil." from <http://www.thaigoodview.com/library/studentshow/2549>.

Bridgwater, A. V. and G. V. C. Peacocke (2000). "Fast pyrolysis processes for biomass." Renewable and Sustainable Energy Reviews **4**: 1-73.

Bridgwater, T. (2006). "Biomass for energy." Journal of the Science of Food and Agriculture **86**(12): 1755-1768.

Chang, M. C. (2007). "Harnessing energy from plant biomass." Curr Opin Chem Biol **11**(6): 677-684.

Chen, Y., et al. (2010). "Study of the co-deoxy-liquefaction of biomass and vegetable oil for hydrocarbon oil production." Bioresour Technol **101**(12): 4600-4607.

Cheng, S., et al. (2010). "Highly Efficient Liquefaction of Woody Biomass in Hot-Compressed Alcohol–Water Co-solvents†." Energy & Fuels **24**(9): 4659-4667.



Demirba, A. (1997). "Calculation of higher heating values of biomass fuels." Fuel **76**(5): 431-434.

Dorrestijn, E., et al. (2000). "The occurrence and reactivity of phenoxyl linkages in lignin and low rank coal." Anal. Appl. Pyrolysis **54** 153-192

Greencoun (2012). "กระถินยักษ์ Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit." from <http://www.greencoun.com/Leucaena1.php>.

Greenergize, T. "พลังงานชีวมวล." from <http://www.thaigreenergize.com/knowledge/>.

Jena, U. and K. C. Das (2011). "Comparative Evaluation of Thermochemical Liquefaction and Pyrolysis for Bio-Oil Production from Microalgae." Energy & Fuels **25**(11): 5472-5482.

Kang, S., et al. (2013). "Hydrothermal conversion of lignin: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews **27**: 546-558.

Kebelmann, K., et al. (2013). "Thermo-chemical behaviour and chemical product formation from Polar seaweeds during intermediate pyrolysis." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis **104**: 131-138.

Kleinert, M., et al. (2009). "Optimizing solvolysis conditions for integrated depolymerisation and hydrodeoxygenation of lignin to produce liquid biofuel." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis **85**(1-2): 108-117.

Lehmann, J. and S. Joseph (2009). "Biochar for Environmental Management: An Introduction." Science and Technology: 134.

Liu, Y., et al. (2013). "Thermochemical liquefaction of rice husk for bio-oil production in mixed solvent (ethanol–water)." Fuel Processing Technology **112**: 93-99.

Miao, X. and Q. Wu (2004). "High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*." J Biotechnol **110**(1): 85-93.

Mohan, D., et al. (2006). "Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review." Energy & Fuels **20**: 848-889.

Ptasinski, K. J., et al. (2007). "Exergetic evaluation of biomass gasification." Energy **32**(4): 568-574.

Pütün, E. (2010). "Catalytic pyrolysis of biomass: Effects of pyrolysis temperature, sweeping gas flow rate and MgO catalyst." Energy **35**(7): 2761-2766.

Qu, Y., et al. (2003). "Experimental study on the direct liquefaction of *Cunninghamia lanceolata* in water." Energy **28**(7): 597-606.

Song, L., et al. (2014). "Thermal cracking of *Enteromorpha prolifera* with solvents to bio-oil." Energy Conversion and Management **77**: 7-12.

Sriwaragroup (2009). "Fuel oil ". from <http://sriwaragroup.com/index.html>.

teerayutt (2009). "พลังงานทดแทนแห่งอนาคต เชื้อเพลิงเอทานอล." from <http://www.vcharkarn.com/blog/40490/1>.

Waffleice (2548). "คุณสมบัติของน้ำมันเตา." from <http://www.atriumtech.com/>.

Xu, Y., et al. (2009). "Upgrading of liquid fuel from the vacuum pyrolysis of biomass over the Mo–Ni/V–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts." Biomass and Bioenergy **33**(8): 1030-1036.

Yang, Y. B., et al. (2008). "Combustion of a Single Particle of Biomass." Energy & Fuels **22**: 306–316.

Yin, Q., et al. (2010). "Review of Bio-oil Upgrading Technologies and Experimental Study on Emulsification of Bio-oil and Diesel." 343-347.

Yokoyama, S. and Y. Matsumura (2008). "A Guide for Biomass Production and Utilization." The Asian Biomass Handbook: 1-326.

Yuan, X., et al. (2007). "Sub- and supercritical liquefaction of rice straw in the presence of ethanol–water and 2-propanol–water mixture." Energy **32**(11): 2081-2088.

Yuan, X., et al. (2011). "Comparative studies of thermochemical liquefaction characteristics of microalgae using different organic solvents." Energy **36**(11): 6406-6412.

กระทรวงพลังงาน (2552). "พลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร." from <http://www.eppo.go.th/>.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2009). "น้ำมันเตา." from <http://www2.egat.co.th/fuel/>.

ทิพยาวงศ์, น. (2552). เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (2555). "ชีวมวล." from <http://www.apecthai.org>.

วิชาการดอทคอม (2010). "พลังงานน้ำมัน...ขับเคลื่อนเศรษฐกิจ." from <http://www.takchamber.com/>.

ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล (2549). ชีวมวล. กรุงเทพมหานคร, คิว พรินท์ แมเนจเม้นท์.





## ภาคผนวก ก

## วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล

## 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

## 1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

- 1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (drying oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเตสลิเคเตอร์ (desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
- 2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่างกลับ
- 3) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
- 4) นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเตสลิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

สูตรการคำนวณ

$$M = 100(W_1 - W_2) / W$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

$W_1$  = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.2 เถ้า (Ash): ASTM D3174

### วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบลพร้อมฝานในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาน
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม
- 3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่ครุชชีเบลพร้อมฝานในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
- 5) นำครุชชีเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

### สูตรการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

เมื่อ A	=	ร้อยละของเถ้า
$W_3$	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝานที่มีเถ้า (กรัม)
$W_4$	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาน (กรัม)
W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

### วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบลพร้อมฝานในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาน บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

- 5) หย่อนครุชิวีลให้ยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
- 6) นำครุชิวีลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้นประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W]$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	$W_5$	=	น้ำหนักของครุชิวีลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
	$W_6$	=	น้ำหนักของครุชิวีลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
	M	=	ร้อยละของความชื้น

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละเถ้า} - \text{ร้อยละสารระเหย}$$



## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันชีวภาพ

#### 1.1 การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC - 2014 Gas chromatograph (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

##### 1.1.1 แก๊สโครมาโตกราฟมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

- แก๊สพา (Carrier gas)
- ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)
- ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
- คอลัมน์ (Column)
- ดีเทคเตอร์ (Detector)
- เครื่องบันทึก (Recorder)

##### 1.1.2 รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

###### 1.1.2.1 แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจายดี มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

### 1.1.2.2 คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสาร เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์

### 1.1.2.3 ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือ ส่วนที่สามารถบ่งบอกในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นๆที่แตกต่างไปจากแก๊สพา ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถสัญญาณกับสารต่างๆในลักษณะเฉพาะ และมีสภาพไวเพียงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

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

#### ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่ง ขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์ แล้วดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเปลี่ยนสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

## 1.2 การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 Gas chromatograph-Mass spectrometry (GC/MS) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้สำหรับวิเคราะห์สารเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ซึ่งสามารถวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่ผสมรวมกันหลายชนิดในปริมาณต่ำระดับนาโนกรัม โดยการแยกให้เป็นสารบริสุทธิ์ และสารประกอบอินทรีย์ที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องระเหยได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 450 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจวัดเรียบร้อยแล้วจะแสดงผลออกมาในรูปของโครมาโตแกรม (Chromatogram)

### 1.2.1 แมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนผสมในตัวอย่าง และเพื่อการพิสูจน์เอกลักษณ์สาร ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยรูปแบบของการแตกไอออน (fragmentation pattern) อันเนื่องมาจากการเกิด ionization ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะแสดงความแตกต่างของค่ามวลต่อประจุออกมา ( $m/z$ ) กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง ion abundance และ  $m/z$  ของ fragment ion ต่างๆ ที่เกิดขึ้นถูกเรียกว่า mass spectrum ซึ่งให้ข้อมูลทางโครงสร้างเพื่อใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลจากเทคนิคอื่นๆร่วมด้วย

### 1.2.2 หลักการของแมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry)

โมเลกุลถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนภายในบริเวณ ionization chamber ซึ่งถูกเรียกว่าแหล่งไอออน (Ion Source) ไอออนจะถูกดึงและโฟกัสด้วยชุดของเลนส์และถูกแยกโดยหน่วยวิเคราะห์มวล (Mass Analyzer) จากนั้นไอออนจะถูกกำหนดให้ไปตกกระทบที่เครื่องตรวจวัดไอออน (Ion Detector) ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของไอออนในตัวอย่าง กระแสไอออนจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป digital signal และถูกบันทึกใน data system ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณนี้อยู่ในรูปที่เรียกว่าแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) และสามารถนำไปใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างต่อไป

### 1.2.3 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) แสดงได้ดังรูปที่ ข. 1

1.2.3.1 ส่วนการป้อนสารอัตโนมัติ (Auto sampler)

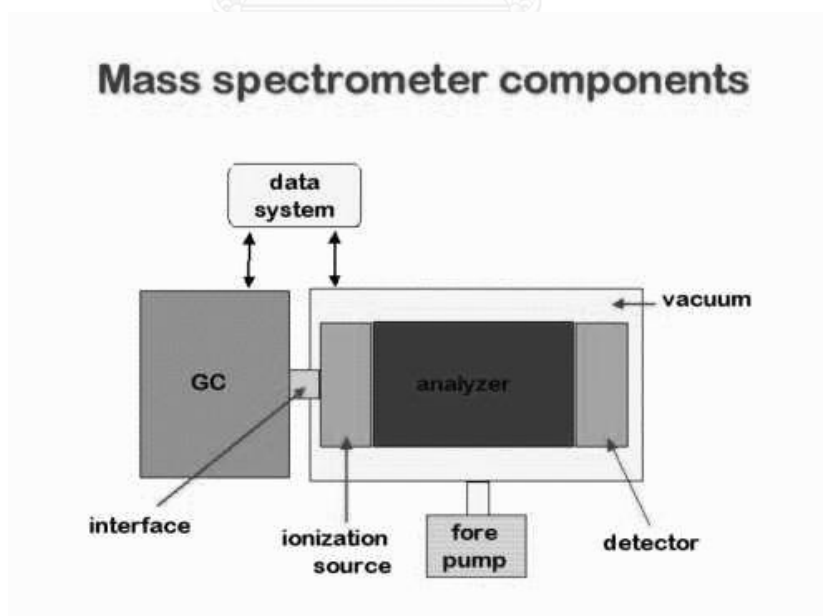
1.2.3.2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

- Injector
- Oven column

1.2.3.3 ส่วนการเชื่อมต่อ (Interface)

1.2.3.4 แมสสเปกโตรเมตรี (MS)

- Ionization เป็นชนิด EI ใช้ศักย์ไฟฟ้า 70 eV
- Mass analysis เป็นแบบ Quadrupole Mass Filters โดยการให้ความถี่ชนิด DC และชนิด AC ไปที่ mass analyzer ซึ่งประกอบด้วยแท่งรูปทรง hyperbolic จำนวน 4 แท่ง การเพิ่มของความถี่ชนิด DC และชนิด AC ทำให้ไอออนที่มีค่า  $m/z$  ต่ำไปสู่สูง สามารถ oscillate ไปถึง detector ได้ตามลำดับ
- Ion detection



รูปที่ ข. 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) (KMITL, 2012)

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

#### 1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ} = 100 [(W_{\text{liq}} - W_{\text{bank fo}})/W_{\text{db}}]$$

#### 2. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} = 100 [W_{\text{ash}} - W_{\text{ash bank fuel oil}} / W_{\text{db}}]$$

#### 3. การคำนวณร้อยละผลได้แก๊สผลิตภัณฑ์ + แก๊สที่สูญหายไป

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส + ผลิตภัณฑ์แก๊สที่สูญหายไป} \\ = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ} - \text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} \end{aligned}$$

โดย

$$W_{\text{db}} = \text{น้ำหนักกระถินยักษ์ที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{\text{ash}} = \text{น้ำหนักกากที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{\text{ash bank fuel oil}} = \text{น้ำหนักกากของน้ำมันเตาที่ปราศจากความชื้น (Bank)*}$$

$$W_{\text{Liq}} = \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว}$$

$$W_{\text{bank fo}} = \text{น้ำหนักของตัวทำละลายน้ำมันเตา (Bank)*}$$

Bank\* = เป็นการทดลองโดยไม่ใส่ชีวมวล เพื่อหาการน้ำหนักและของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง; อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์เวลา 60 นาที อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์เท่ากับ 6 ต่อ 1 ปริมาณน้ำมันเตาร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก °C

#### การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักกระถินยักษ์ (Dry basis)} = 15.00 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำมันรวม} = 48.70 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักตัวทำละลายน้ำมันเตา} = 45.60 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักผลได้ของเหลว} = 48.70 - 45 = 3.10 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักกากของแข็ง (Dry basis)} = 4.35 - 0.15 = 4.20 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ} &= 100 \times (3.10/15) = 20.70 \\ \text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} &= 100 \times (4.20/15) = 28.00 \\ \text{ร้อยละผลได้แก๊ส + ผลิตภัณฑ์แก๊สที่สูญหายไป} &= 100 - 20.70 - 28.00 = 51.33 \end{aligned}$$

#### 4. การคำนวณร้อยละองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์

ภาวะของการทดลอง; อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลา 60 นาที อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์เท่ากับ 6 ต่อ 1 ปริมาณน้ำมันเตาร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ตาราง ค.1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard)

ชนิดแก๊ส	area	% balance in N <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	37877.1	1.01
CO	1937.1	1.00
CH <sub>4</sub>	7384.2	0.98
CO <sub>2</sub>	2901.4	1.02

ตาราง ค.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	องค์ประกอบ ผลิตภัณฑ์แก๊ส (%vol)	องค์ประกอบ ผลิตภัณฑ์แก๊ส (mol)
H <sub>2</sub>	202633	5.403	7.915	1.399
CO	9623.3	4.968	7.278	1.287
CH <sub>4</sub>	68106.3	9.038	13.241	2.341
CO <sub>2</sub>	138949	48.848	71.563	12.653

## การคำนวณ

$$\text{องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส (\%vol)} = \frac{(\text{area} \times \%volstd)}{\text{areastd}} \times 100$$

area = พื้นที่ใต้กราฟของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการวิเคราะห์

%volstd = % balance in N<sub>2</sub> ของตัวมาตรฐาน

areastd = พื้นที่ใต้กราฟของผลิตภัณฑ์แก๊สของตัวมาตรฐาน

$$\text{องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส (mol)} = \frac{(P_{\text{สุดท้าย}} - P_{\text{เริ่มต้น}}) \times V}{RT} \times \%vol$$

P<sub>สุดท้าย</sub> = ความดันสุดท้ายหลังจากคลุดาว์น (บาร์)

P<sub>เริ่มต้น</sub> = ความดันเริ่มต้นก่อนการทดลอง (บาร์)

V = ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ - ปริมาตรวัตถุดิบที่ใส่ลงไป (ลิตร)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส = 0.08314 ลิตร. บาร์/เคลวิน โมล

T = อุณหภูมิหลังคลุดาว์น (เคลวิน)

ตัวอย่างการคำนวณ

## องค์ประกอบไฮโดรเจน

$$\text{องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน (\%vol)} = \frac{(202633 \times 1.01)}{37877.1} \times 100 = 7.915$$

$$\text{องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน (mol)} = \frac{(21.5 - 10) \times 0.395}{0.08314 \times 309} \times 7.915 = 1.399$$

**ภาคผนวก จ**  
**ข้อมูลการทดลอง**

**ตารางที่ จ.1** ข้อมูลภาวะในการทดลอง

No.	Conditions									Product			
	Biomass (g)	Fuel oil content (%wt.)	Fuel oil (g)	Water (g)	Stirre speed (rpm)	Temp (°C)	P. In (bar)	Time (min)	Final pressure (bar)	Oil product (g)	Blank fuel oil (g)	Residue solid (g)	Bio oil (g)
1	15	100	90	–	200	350	10	60	73.70	90.47	88.66	5.36	1.81
2	15	50	45	45	200	350	10	60	179.50	48.70	45.6	4.20	3.10
3	15	33.3	30	60	200	350	10	60	167.90	30.6	28.34	5.08	2.26
4	15	16.7	15	75	200	350	10	60	167.90	14.50	12.92	4.44	1.58
5	15	0	–	90	200	350	10	60	172.50	–	–	3.73	1.15
6	15	100	90	–	200	300	10	60	55.70	90.32	89.36	6.49	0.96
7	15	50	45	45	200	300	10	60	97.60	45.50	43.00	5.14	2.50
8	15	33.3	30	60	200	300	10	60	95.70	30.11	28.54	6.37	1.57
9	15	16.7	15	75	200	300	10	60	97.50	14.33	13.26	6.44	1.07
10	15	0	–	90	200	300	10	60	104.50	–	–	4.45	1.96
11	15	50	45	45	200	350	10	30	172.45	46.97	44.89	4.03	2.08
12	15	50	45	45	200	350	10	60	179.50	48.70	45.6	4.20	3.10
13	15	50	45	45	200	350	10	90	170.20	44.46	41.51	5.10	2.95
14	10	50	45	45	200	350	10	60	169.20	47.25	44.89	2.20	2.36
15	15	50	45	45	200	350	10	60	179.50	48.70	45.6	4.20	3.10
16	15	50	45	45	200	350	10	60	179.50	48.70	45.6	4.20	3.10
17	15	50	45	45	300	350	10	60	171.80	45.50	42.24	3.94	3.26
18	15	50	45	45	400	350	10	60	171.60	46.22	42.83	3.67	3.39



ตารางที่ จ.2 ข้อมูลผลการทดลอง (จาก ตารางที่ จ.1)

No.	Yield (% wt.)			% Composition (Oil product)					Acidity mg KOH/g	Water % wt.	HHV (MJ/kg)
	Bio-oil	Solid	Gas	C	H	N	O	S			
1	12.07	35.73	52.20	85.16	12.27	0.21	1.54	0.82	9.87	0.21	46.23
2	20.67	28.00	51.33	77.88	11.03	0.33	10.51	0.25	11.55	0.34	40.36
3	15.07	33.87	51.07	76.98	10.82	0.22	11.64	0.34	10.54	0.52	39.55
4	10.53	29.60	59.87	74.62	9.94	0.16	14.96	0.32	12.23	0.43	36.88
5	7.67	24.87	67.47	71.54	8.07	0.77	19.61	-	17.76	0.52	32.30
6	6.40	43.27	50.33	83.11	11.32	0.37	5.20	1.10	6.93	0.17	43.68
7	16.67	34.27	49.07	75.30	10.47	0.32	13.40	0.52	6.17	0.31	38.16
8	10.47	42.47	47.07	74.16	11.01	0.20	14.22	0.41	9.14	0.39	38.40
9	7.13	42.93	49.93	72.22	10.60	0.37	16.51	0.30	7.23	0.42	36.74
10	13.07	29.67	57.27	70.21	7.74	0.73	21.32	-	28.56	0.51	31.07
11	13.87	26.87	59.27	76.35	11.94	0.50	10.87	0.34	5.50	0.29	41.09
12	20.67	28.00	51.33	77.88	11.03	0.33	10.51	0.25	11.55	0.34	40.36
13	19.67	34.00	46.33	77.37	12.79	0.42	9.22	0.20	5.40	0.36	42.96
14	23.60	22.00	54.40	76.35	11.84	0.51	10.93	0.37	10.03	0.3	40.93
15	20.67	28.00	51.33	77.88	11.03	0.33	10.51	0.25	11.55	0.34	40.36
16	20.67	28.00	51.33	77.88	11.03	0.33	10.51	0.25	11.55	0.34	40.36
17	21.73	26.27	52.00	77.69	10.93	0.46	10.70	0.22	10.20	0.33	40.11
18	22.60	24.47	52.93	78.43	11.07	0.35	9.89	0.26	10.97	0.36	40.71



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวัชร ดาบเงิน เกิดวันที่ 17 พฤศจิกายน 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555

