

การผลิตไบโอดีเซลจากผักตบชวาโดยการโฟโวลีซิสแบบเร็ว



นายสุพจน์ แหวนเพชร

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIO-OIL PRODUCTION FROM WATER HYACINTH BY FAST PYROLYSIS



Mr. Suphot Whanpetch

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตไบโอดีเซลจากผักตบชวาโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว

โดย

นายสุพจน์ แหวนเพชร

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ ชุขลธारा)

กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย)

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุพจน์ แหวนเพชร : การผลิตไบโอดีเซลจากผักตบชวาโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว  
(BIO-OIL FROM WATER HYACINTH BY FAST PYROLYSIS).

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์, 98 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพโดยตัวแปรที่ทำการศึกษได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค อัตราการป้อน อัตราการไหลของแก๊สดัดอากาศ ศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 400, 425, 450, 475 และ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ช่วงขนาดได้แก่ อนุภาคน้อยกว่า 425 ไมโครเมตร, 425-600 ไมโครเมตรและ 600 ไมโครเมตร-1มิลลิเมตร อัตราการป้อนสาร 1.29, 1.4, 1.6, 1.8 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 0, 50, 100, 150, 200, 400 มิลลิลิตร/นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคที่ 425-600 ไมโครเมตร อัตราการป้อนที่ 1.4 กิโลกรัม/ชั่วโมง และอัตราการไหลของไนโตรเจน 200 มิลลิลิตร/นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสแบบเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกสามส่วนคือ ส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์เหลวร้อยละ 38.23 แก๊สร้อยละ 43.36 และถ่านชาร์ร้อยละ 21.10 โดยที่ส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว(38.23%) แบ่งได้สองส่วน คือ น้ำมันเบา (22.98 %)และน้ำมันหนัก (15.25%) ค่าความร้อนน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก 41.05 และ 31.0 เมกกะจูล/กิโลกรัมตามลำดับ คุณสมบัติทางเคมีของไบโอดีเซลพบปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในน้ำมันเบามากกว่ามากกว่าในน้ำมันหนัก และน้ำมันทั้งสองมีสภาพเป็นกรดและมีขี้ขี้ที่สามารถละลายในอะซีโตนและไฮโดรฟูแรนได้ดี การกักต้อนแผ่นทองแดงน้ำมันเบาและหนักอยู่ในระดับเล็กน้อย วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดพบ หมู่ฟังก์ชัน ไฮดรอกไซด์ อัลคีน คีโตน คาร์บอกซิลิก และอะโรแมติก วิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปีพบองค์ประกอบหลักในน้ำมันเบาได้แก่ 1,3-ไซโคลเพนเทนไดโอน 2-เพนทาโนน, 4-ไฮดรอกซิล 4-ไดเมทิล- และ 4-ไพเพอริไดโอน 2, 2, 6, 6-เตตระเมทิล- และในน้ำมันหนักพบ 2-เพนทาโนน 4, ไฮดรอกซีเมทิล 2-เพนทาโนน, 4-ไฮดรอกซี- และฟีนอล

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อผู้พิมพ์.....  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2552.....

## 5072525423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: WATER HYACINTH/FAST PYROLYSIS/BIO-OIL/LIGHT OIL/HEAVY OIL

SUPHOT WHANPETCH : BIO-OIL PRODUCTION FROM WATER HYACINTH BY  
FAST PYROLYSIS

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF THARAPONG VITIDSANT, PH.D., 98 pp.

This research is focused to study the fast pyrolysis of water hyacinth in continuous reactor. The effects of parameters for pyrolysis on bio-oil yield, chemical and physical properties were investigated. The experimental parameters for fast pyrolysis were the temperature range of 400-500 °C, three particle size as 425 µm , 425-600 µm and 600 µm – 1 mm, biomass feed rate of 1.29 -1.8 kg/h, and flow rate of nitrogen using as sweeping gas range of 0-400 ml/min at room condition were varied. The temperature at 450 °C, particle size of 425-600 µm, biomass feed rate of 1.4 kg/hr and nitrogen flow rate 200 ml/min is the optimum condition. The product of this condition was separated to 3 parts, which was composed of 38.23 % of bio-oil, 40.67 % of gas and 21.10 % char. While the bio-oil, 38.23% could be separated to light and heavy oil portion 22.98% and 15.25 % and giving heating value of 41.05 and 31.0 MJ/kg respectively. The chemical property of bio-oil showed higher content of carbon and hydrogen in light than in heavy oil and both oil were acidic and polar oil, which could well dissolve in acetone and tetrahydrofuran. The copper strip of corrosion of light oil and heavy is in level slight tarnish. FTIR, showed the functional group as hydroxide, alkenes, ketone, carboxylic and aromatic; GC-MS showed 1,3-Cyclopentanedione 2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl- and 4-Piperidinone, 2, 2, 6, 6-tetramethyl- in light oil and showed 2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl 2-Pentanone, 4-hydroxy- and phenol in heavy oil

Department:.....Chemical Technology.....Student's signature.....*Suphot Whanpetch*.....

Field of Study:....Chemical Technology....Advisor's signature.....*T. Vitidsant*.....

Academic Year:.....2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์ที่เป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักซึ่งท่านได้คอยให้ความช่วยเหลือเป็นห่วงเป็นใยในทุกๆ ด้าน รวมทั้งให้คำชี้แนะที่มีประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัย พร้อมกันนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านใน ภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

งานวิจัยเรื่อง “การผลิตไบโอออยล์จากผักตบชวาโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว” สำเร็จลุล่วง ไปด้วยดีโดยขอขอบคุณการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และทุนวิจัยจากบริษัท ปตท จำกัด(มหาชน)

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวีรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ธิญะระนันท์ ดร.กันต์ กังวานสายชล ที่ ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณสุรัตน์ พุทธา คุณประจักษ์ ทรัพย์อุดมมาก และคุณดุษฎี บัณฑิตที่ให้ คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ วิเคราะห์ต่าง ๆ และขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ได้ให้ความ ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจให้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
	1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
	1.4 ขั้นตอนของดำเนินงานวิจัย.....	5
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
	2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	7
	2.2 ชีวมวล.....	9
	2.3 การผลิตชีวมวลในประเทศ.....	10
	2.4 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล.....	17
	2.5 โครงสร้างทางกายภาพชีวมวล.....	21
	2.6 ส่วนประกอบชีวมวล.....	22
	2.7 หลักการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวล.....	23
	2.8 กลไกการไพโรไลซิส.....	27
	2.9 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อการไพโรไลซิส.....	33
	2.10 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส.....	37
	2.11 ไบโอดีออยล์และการประยุกต์ใช้.....	49
	2.12 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์.....	41
	2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46

บทที่	หน้า
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	50
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	50
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	54
3.3 วิธีการทดลอง.....	54
3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
4 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	57
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติผักตบชวา.....	57
4.1.1 การวิเคราะห์แบบปริมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	57
4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวผักตบชวาด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....	58
4.1.3 การวิเคราะห์หาธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในผักตบชวาด้วย เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	59
4.2 ผลของตัวแปรต่างๆต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	60
4.2.1 ผลของอุณหภูมิ.....	60
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาค.....	62
4.2.3 ผลของอัตราการป้อน.....	63
4.2.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพา.....	64
4.3 อัตราส่วนน้ำมันหนักและน้ำมันเบา.....	65
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของน้ำมัน.....	66
4.5 ผลการทดสอบองค์ประกอบด้านเคมี.....	72
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	88
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติของแข็ง.....	89
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	98



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบปริมาณการนำเข้าเชื้อเพลิง (ปริมาณล้านลิตร).....	7
2.2	เปรียบเทียบการส่งออกน้ำมันเชื้อเพลิง (ปริมาณล้านลิตร).....	8
2.3	องค์ประกอบของฝักตบชวา.....	16
2.4	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด.....	17
2.5	แสดงองค์ประกอบของแก๊สเมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ.....	26
2.6	ประเภทการไพโรไลซิสแบบต่างๆ.....	27
2.7	ปฏิกิริยาคายความร้อนของเซลลูโลส.....	29
2.8	สมบัติทางกายภาพของเหลวจากไพโรไลซิส.....	38
2.9	สมบัติทางเคมีของเหลวจากไพโรไลซิสเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา.....	39
2.10	แสดงลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ.....	45
4.1	การวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ.....	57
4.2	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ.....	58
4.3	การวิเคราะห์หาโลหะด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence.....	59
4.4	ผลการเปรียบเทียบปรับสกรูกับอัตราการป้อนสาร.....	63
4.5	แสดงร้อยละอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก.....	65
4.6	แสดงค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	67
4.7	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันหนักและน้ำมันเบา.....	67
4.8	แสดงค่าความมีซัลเฟอร์ของสารต่างๆ.....	70
4.9	ปริมาณกำมะถันของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	72
4.10	วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุด้วยเครื่อง CHNS Analyzer.....	72
4.11	แสดงผลการวิเคราะห์โลหะในถ่านชาร์.....	73
4.12	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส.....	74
4.13	องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันหนักและน้ำมันเบาจากไพโรไลซิสฝักตบชวา....	74
4.14	แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเบาจากไพโรไลซิสฝักตบชวาโดย GC-MS.....	77
4.15	แสดงองค์ประกอบของน้ำมันหนักจากไพโรไลซิสฝักตบชวาโดย GC-MS.....	78

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....	18
2.2	การจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลส.....	19
2.3	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.....	20
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน.....	21
2.5	กระบวนการแปรรูปทางความร้อน.....	24
2.6	กลไกสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ.....	28
2.7	การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลาง.....	29
2.8	กลไกการแตกตัวขององค์ประกอบชีวมวล.....	30
2.9	การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง.....	31
2.10	การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน.....	32
2.11	แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ.....	42
2.12	แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน.....	42
2.13	แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ.....	43
2.14	แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบแอบลาทีฟ.....	44
2.15	แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบส่วาน.....	44
2.16	แสดงประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์และความสนใจใช้ในอุตสาหกรรม.....	45
3.1	แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	50
3.2	ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	51
3.3	เครื่อง เทอร์โมกราวิเมตริก อนาไลเซอร์.....	52
3.4	เครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟี (ยี่ห้อ SHIMADZU).....	52
3.5	เครื่อง รีโอมิเตอร์(ยี่ห้อ Haake Roto visco1, Haake Phoenix II).....	53
3.6	เครื่อง เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสเปกโตรมิเตอร์.....	53
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TG) และอัตราการ สูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของผักตบชวาที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศา เซลเซียส/นาที ความดันบรรยากาศในโตรเจน.....	59
4.2	แผนภาพผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	60
4.3	แผนภาพผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	62
4.4	แผนภาพผลของอัตราการป้อนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	64

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
4.5	แผนภาพผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	65
4.6	ภาพตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิส.....	66
4.7	กราฟแสดงค่าความหนืดของน้ำมันหนักที่อุณหภูมิต่างๆ.....	68
4.8	ภาพแสดงการละลายของน้ำมัน.....	70
4.9	ภาพการกักกรองของน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM D130/IP 154.....	71
4.10	องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของไพโรไลซิส (ก) น้ำมันเบา (ข) น้ำมันหนักจากไพโรไลซิสผัดดับชวา.....	75
4.11	โครมาโตแกรมน้ำมันเบาของผัดดับชวาจากแก๊สโครมาโตกราฟีชนิดแมสสเปกโทสโกปี.....	76
4.12	โครมาโตแกรมน้ำมันหนักของผัดดับชวาจากแก๊สโครมาโตกราฟีชนิดแมสสเปกโทสโกปี.....	77

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระบบเศรษฐกิจและการดำเนินชีวิตประจำวันและปัจจัยที่ทำให้ประเทศขับเคลื่อนไปข้างหน้าทั้งในด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรมและภาคธุรกิจบริการในแต่ละปีความต้องการใช้พลังงานเพื่อตอบสนองความต้องการพื้นฐานมีอัตราส่วนที่สูง การจัดการด้านพลังงานภายในประเทศให้มีความต้องการที่เพียงพอและต้นทุนที่เหมาะสมเป็นจึงไปได้ยากเนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งพลังงานที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ไม่เพียงพอ ประกอบกับการที่ประเทศไทยต้องพึ่งพาพลังงานนำเข้าจากต่างประเทศ และได้รับผลกระทบจากวิกฤติราคาน้ำมันแพงและสถานการณ์ความไม่มั่นคงทางการเมืองขณะนี้ ส่งผลให้ประเทศตกอยู่ในความเสี่ยงที่ราคาน้ำมันถูกกำหนดโดยผู้ค้า ดังนั้น การประยุกต์ใช้ปรัชญา หลักเศรษฐกิจพอเพียงตามแนวพระราชดำริของ “พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว” ในกิจการพลังงานของประเทศ โดยมุ่งเน้นใช้พลังงานอย่างรู้คุณค่า รู้จักเลือกใช้ เท่าที่จำเป็นเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ โดยพิจารณาเลือกใช้พลังงานทดแทนที่มีอยู่ในประเทศ หรืออยู่ในชุมชนก่อนเป็นอันดับแรก สามารถที่จะแก้ไขการขาดดุลการค้าเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งราคาสินค้าเกษตรเมื่อเทียบกับราคาน้ำมันแล้วยังอยู่ในระดับต่ำกว่า ดังนั้นเพื่อความมั่นคงด้านพลังงาน ความเพียงพอ มีใช้อย่างทั่วถึงและราคาเป็นธรรม ประเทศไทยจะเป็นฝ่ายรับอย่างที่เคยเป็นมา หรือมีทางเลือกใหม่ที่ประเทศกำหนดเองและสามารถเปลี่ยนเป็น “ตั้งรุก” ได้การเปลี่ยนประเทศโดยการ “ตั้งรุก” คือการที่เปลี่ยนจากการเป็นผู้ซื้อและนำเข้าพลังงานอย่างเดียว มาเป็นผู้ขาย (Supply Side) หรือผู้ผลิตน้ำมันบ้าง โดยพิจารณาจุดแข็งที่ประเทศมีศักยภาพ โดยเฉพาะด้านการเกษตรกรรม

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรกรรมเป็นจำนวนมาก การกำจัดโดยการเผาทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปอย่างไร้ประโยชน์ การนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยการแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป เช่น

น้ำมันและถ่านหิน ทั้งยังช่วยลดการขาดดุลการค้า ส่งเสริมการประกอบอาชีพของเกษตรกร เป็นต้น อีกทั้งชีวมวลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเป็นเชื้อเพลิงสะอาดซึ่งปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>), ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ต่ำกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ที่ส่งผลต่อสภาวะโลกร้อน (Global warming)

ชีวมวลเป็นอินทรีย์สารมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบทั้งคาร์บอน, ออกซิเจน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ ที่สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้ พลังงานทางเคมีของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ได้ สะสมอยู่ในรูปของโครงสร้างชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลหรือพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้

กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพกระทำได้โดยเทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis), แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification), ลิกวิดแฟคชัน (Liquidfaction) และการเผาไหม้ (Combustion) โดยไพโรไลซิสเป็นกระบวนการให้ความร้อนในภาวะที่ไม่มีอากาศ หรือออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊ส น้ำมันทาร์ และถ่านชาร์โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน เวลาและชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ การไพโรไลซ์ที่อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูง จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นผลิตภัณฑ์หลัก แก๊สที่ได้ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ

ผักตบชวามีชื่อสามัญว่า “Water Hyacinth” เป็นพืชน้ำประเททใบเลี้ยงเดี่ยว ลอยน้ำได้โดยไม่ต้องมีที่ยึดเกาะ สามารถแพร่พันธุ์ได้รวดเร็วมาก แผ่นใบคล้ายรูปหัวใจเป็นมันหนา ก้านใบพองออกตรงช่องกลาง ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุนช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4-10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส และในต้นพืชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 (ในใบร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ

ละ 96.7) องค์ประกอบของผักตบชวา จะประกอบไปด้วยสารประกอบลิกโนเซลลูโลสที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลสร้อยละ 43-45 ลิกนินร้อยละ 12-15 แป้งโตซานร้อยละ 14-15 และสารประกอบอื่นๆ ผักตบชวามีประสิทธิภาพช่วยในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นตัวกรอง ผักตบชวาที่ขึ้นอยู่อย่างหนาแน่นเปรียบได้กับการบรรจุวัสดุพูนซึ่งกรองน้ำที่ไหลผ่านกอผักตบชวาอย่างช้าๆ จึงทำให้ของแข็งแขวนลอยต่างๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้นทั้งยังดูดซึมสารประกอบแอมโมเนีย ไนเตรท และฟอสเฟต ได้ดี ของเสียในน้ำจึงถูกกำจัดไปนอกจากนั้น ระบบรากที่มีจำนวนมากช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียดและจุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่รากช่วยดูดสารอินทรีย์ไว้ด้วยอีกทางหนึ่งแต่การใช้ผักตบชวาบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง จะส่งผลให้ผักตบชวาเจริญเติบโตเร็วขึ้นและปกคลุมพื้นที่ผิวน้ำมากขึ้นจึงควรมีการดูแลระบบเก็บต้นที่เจริญเต็มที่ขึ้นจากน้ำอย่างสม่ำเสมอ

ประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่ประสบปัญหาการระบาดของผักตบชวา ซึ่งการระบาดที่รวดเร็วส่งผลเสียต่อระบบนิเวศของน้ำ เช่น ค่าความเป็นกรด-เบสที่เพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิของน้ำ และความเป็นพิษของแหล่งน้ำ ทั้งยังส่งผลเสียต่อการชลประทาน การเกษตรกรรม การคมนาคมทางน้ำ ตลอดจนถึงด้านสาธารณสุข อีกทั้งการนำมาใช้ประโยชน์มีน้อยมีเพียงร้อยละ 5 ของปริมาณทั่วประเทศ

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพ (ไบโอดีเซล) จากผักตบชวา โดยศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพและวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพเพื่อนำน้ำมันชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทนหรือสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว
2. ศึกษาถึงตัวแปรและภาวะที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากผักตบชวา
3. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบชุดกระบวนการไพโรไลซิสทำการไพโรไลซิสผักตบชวาแบบเร็วเพื่อให้ได้ น้ำมันชีวภาพโดยหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิต
2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่ได้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมผักตบชวาแห้งบดละเอียดความชื้นน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้ในการทดลอง โดยนำไปร่อนแยกขนาดในตะแกรงร่อน เพื่อแยกให้มีขนาด น้อยกว่า 450 ไมโครเมตร, 450-600 ไมโครเมตรและ 600-1000 ไมโครเมตร
3. วิเคราะห์สมบัติของผักตบชวาก่อนทำการทดลอง
  - องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis): ASTM 3172, 3173, 3174 และ 3175 ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า
  - องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis): ASTM D3176 ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถันด้วยเครื่อง CHNS Analyzer
  - ปริมาณค่าความร้อน (Gross Calorific Value) ASTM :D 2015
  - การสูญเสียน้ำหนักเมื่อให้ความร้อนด้วยเทอร์มัลกราวิเมตริก/ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลอานาไลเซอร์ (Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer) (TGA/DTA)

4. ไพโรไลซิสผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (continuous reactor) โดยมีตัวแปรดังนี้ได้แก่
  - อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส
  - อัตราการป้อนสารตัวอย่าง
  - อัตราการไหลของแก๊สตัวพา
  - เวลาในการทำปฏิกิริยา 0.5-2 วินาที
  - ขนาดอนุภาค
5. วิเคราะห์องค์ประกอบด้านเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้
  - วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (Gross Calorific Value) ตามมาตรฐาน ASTM : D 2015
  - ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass spectrometry, GC-MS)
  - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและกำมะถันด้วยเครื่อง CHNS Analyzer
  - วิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สไมโครโครมาโทกราฟี (Gas Micro Chromatography)
6. วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ
  - จุดวาบไฟของน้ำมันชีวภาพตามมาตรฐาน ASTM D 93
  - ความหนืดของไบโอดีเซลด้วยเครื่อง Rheometer
  - ค่าความเป็นกรด-เบสด้วย pH meter
7. วิเคราะห์สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์



### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากผักตบชวาโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว
2. ได้น้ำมันชีวภาพที่มีองค์ประกอบและสมบัติที่สามารถนำไปกลั่นแยกใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลได้หรือนำไปเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมผลิตภัณฑ์ทางเคมีต่อไป



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

จากสภาวะการณ์การขาดแคลนพลังงานภายในประเทศและผลกระทบจากวิกฤติราคาน้ำมันแพงในปัจจุบันนี้ อีกทั้งยังต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานจากต่างประเทศ ทำให้การนำเข้าพลังงานทั้งในส่วน of น้ำมันดิบ น้ำมันสำเร็จรูปและแก๊สธรรมชาติอยู่ในปริมาณที่สูง เมื่อเทียบกับการผลิตได้ภายในประเทศ แสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ส่งผลให้ประเทศอยู่ในความเสี่ยงการขาดดุลการค้าโดย

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบปริมาณการนำเข้าเชื้อเพลิง (ปริมาณล้านลิตร)

ลำดับที่	ชนิดน้ำมัน	2550	2551	อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
				2550	2551
1	น้ำมันเบนซิน	175.892	31.613	—	(82.0)
	น้ำมันเบนซิน ออกเทน 91	135.192	—	—	(100.0)
	น้ำมันเบนซิน ออกเทน 95	26.944	—	—	(100.0)
	น้ำมันเบนซินพื้นฐาน	13.756	31.613	—	129.8
2	น้ำมันอากาศยาน	42.757	47.938	26.1	12.1
	น้ำมันอากาศยานเจท เอ 1	39.252	44.296	29.2	12.9
	น้ำมันอากาศยาน100/130	3.458	3.618	(2.0)	4.6
	น้ำมันอากาศยาน เจที 5	0.047	0.024	—	(48.9)
3	น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว	190.999	89.636	(47.6)	(53.1)
	น้ำมันดีเซลหมุนเร็วธรรมดา	190.999	—	(47.6)	(100.0)
	น้ำมันดีเซลพื้นฐาน	—	89.636	—	—
4	น้ำมันเตา	536.253	254.261	(51.5)	(52.6)
	รวม	945.901	423.448	(37.1)	(55.2)
5	แก๊ซแอลพีจี (ล้าน กก.)	—	6.268	—	—
6	แก๊ซโพรเพน (ล้าน กก.)	—	244.793	—	—
7	แก๊ซบิวเทน (ล้าน กก.)	—	201.009	—	—
8	ยางมะตอย (ล้าน กก.)	4.389	7.812	82.4	78.0
	รวม	4.389	459.882	82.4	10,378.1
9	น้ำมันดิบ	46,671.277	47,224.986	(3.0)	1.2
10	แก๊ซธรรมชาติ (ล้านลูกบาศก์ฟุต)	397,540.000	363,737.000	4.6	(8.5)

หมายเหตุ : 1. การนำเข้าน้ำมันดิบ รวมวัตถุดิบอื่นๆ ได้แก่ High Sulphur Diesel , Waxy Distillate Long Residue

2. การนำเข้า โพรเพนและก๊าซบิวเทนเพื่อการผลิตก๊าซแอลพีจี เบนซินพื้นฐานเพื่อการผลิตก๊าซโซฮอล์และดีเซลพื้นฐานเพื่อการผลิตดีเซลหมุนเร็วธรรมดา

ที่ราคาน้ำมันถูกกำหนดโดยผู้ค้า ในขณะที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งราคาสินค้าเกษตรเมื่อเทียบกับราคาน้ำมันแล้วยังอยู่ในระดับต่ำกว่า

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการส่งออกน้ำมันเชื้อเพลิง (ปริมาณล้านลิตร)

ลำดับที่	ชนิดน้ำมัน	2550	2551	อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
				2550	2551
1	น้ำมันเบนซิน	1,578.921	1,478.370	(17.8)	(6.4)
	น้ำมันแก๊สโซฮอล์ อี 10 ออกเทน 95	—	1.286	—	—
	น้ำมันเบนซิน ออกเทน 91	543.235	647.956	5.6	19.3
	น้ำมันเบนซิน ออกเทน 95	1,035.686	829.128	(26.4)	(19.9)
2	น้ำมันก๊าด	37.187	108.554	9.5	191.9
3	น้ำมันอากาศยาน	448.976	1,346.809	(55.9)	200.0
	น้ำมันอากาศยานเจท เอ 1	448.944	1,346.496	(55.9)	199.9
	น้ำมันอากาศยาน 100/130	0.032	0.313	(61.9)	878.1
4	น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว	2,689.491	3,806.271	(8.5)	41.5
	น้ำมันดีเซลหมุนเร็วธรรมดา	2,689.491	369.041	(8.5)	(86.3)
	น้ำมันดีเซลพื้นฐาน	—	3,437.230	—	—
5	น้ำมันเตา	2,478.032	3,624.309	74.7	46.3
	รวม	7,232.607	10,364.313	(1.4)	43.3
6	ก๊าซแอลพีจี (ล้าน กก.)	277.563	21.235	(51.8)	(92.3)
7	โพรเพน (ล้าน กก.)	—	0.072	—	—
8	บิวเทน (ล้าน กก.)	—	0.003	—	—
9	ยางมะตอย (ล้าน กก.)	614.115	548.360	26.3	(10.7)
	รวม	891.678	569.670	(16.1)	(36.1)

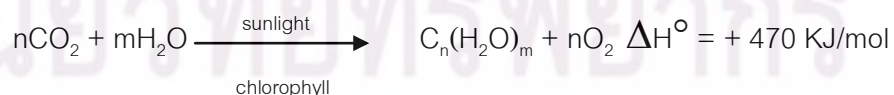
(ที่มา กระทรวงพลังงาน, 2552)

ดังนั้น เพื่อความมั่นคงด้านพลังงาน ความเพียงพอ มีใช้อย่างทั่วถึงและราคาเป็นธรรม ประเทศไทยจะเป็นฝ่ายรับอย่างที่เคยเป็นมา หรือมีทางเลือกใหม่ที่ประเทศกำหนดเองและสามารถเปลี่ยนเป็น “ตั้งรูก” ได้ การเปลี่ยนประเทศโดยการ “ตั้งรูก” คือการที่เปลี่ยนจากการเป็นผู้ซื้อและนำเข้าพลังงาน

อย่างเดียวกันเป็น ผู้ขาย (Supply Side) หรือผู้ผลิตน้ำมันบ้าง โดยพิจารณาจุดแข็งที่ประเทศมีศักยภาพ ได้แก่ชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรกรรม ประกอบกับนโยบายด้านพลังงาน(กระทรวงพลังงาน 2552) ของประเทศที่จะเพิ่มการใช้ชีวมวลจากร้อยละ 0.5 ในปี 2545 เป็นร้อยละ 8.0 ในปี 2554 คิดเป็นจำนวน 6.5 เมกกะตันน้ำมันดิบ จึงนับเป็นโอกาสอันดีที่ประเทศไทยจะเพิ่มการใช้ชีวมวลมากขึ้น แบ่งเป็นจากสิ่งเหลือทิ้งจากพืชชีวมวลจำนวน 13.0 เมกกะตันน้ำมันดิบต่อปี และจากน้ำเสียอุตสาหกรรมจำนวน 4.1 เมกกะตันน้ำมันดิบต่อปี เช่น อ้อย มันสำปะหลัง และปาล์มน้ำมัน เป็นต้น มาผลิตเชื้อเพลิงเรียกว่า พลังงานชีวมวล เช่น ไบโอดีเซล เอทานอล และไบโอดีเซล

## 2.2 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวลคือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตรเช่น แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานประเภทหนึ่งคือพลังงานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้สะสมอยู่ใน แหล่งกำเนิดของคาร์บอนและไฮโดรเจนมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การสังเคราะห์แสงของพืชจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำไปเป็นสารอินทรีย์ต่างๆที่สามารถเผาไหม้ได้ องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับกระบวนการนี้ คือ คลอโรฟิลล์ และแสงอาทิตย์ โดยคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่ในพืชสีเขียวจะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงขึ้นปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังสมการที่ (Probstein and Hicks, 1982)



$\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$  แสดงถึงสารประกอบอินทรีย์จำพวกคาร์โบไฮเดรตและสารอื่นๆที่สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยา คาร์โบไฮเดรตประมาณหนึ่งในสี่จากการสังเคราะห์แสงจะถูกออกซิไดซ์ต่อด้วยกระบวนการผันกลับได้ของการหายใจในพืชเพื่อให้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต โดยส่วนที่เหลือจะสะสมไว้ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้เพราะขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืชนั้นพืชใช้

คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บส่วนต่างๆของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็ได้พลังงานออกมา (อุส่าห์ 2546)

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกออกได้ 4 ประเภท ตามแหล่งที่มาดังนี้

1. พืชผลทางการเกษตร (Agriculture crops) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ที่เป็นแหล่งพลังงานของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆที่สามารถนำมาเป็นพลังงานได้
2. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agriculture residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามัน สำปะหลัง รวมถึงพืชที่แพร่ระบาดในการเกษตรกรรม เช่น หญ้าคา ผักตบชวา
3. ไม้และเศษไม้ (Wood and Wood residues) ไม้โตเร็วเช่น ยูคาลิปตัส กระจินณรงค์ กระจินเทพา เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือนและโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ
4. ของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน (Waste stream) เช่นกากน้ำตาลและขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ขี้เลื่อย เส้นใยปาล์มและกะลาปาล์ม

### 2.3 การผลิตชีวมวลภายในประเทศ

ชีวมวลในประเทศไทยมีหลายชนิดซึ่งในการใช้ประโยชน์ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและจุดเด่นจุดด้อยที่มีความแตกต่างกันไป บางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้า เช่น กากมันสำปะหลัง ผักตบชวา เพราะมีความชื้นสูงร้อยละ 80-90 บางชนิดต้องผ่านการบดย่อย เช่น เศษไม้ เป็นต้น โดยศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อมได้ระบุถึงคุณสมบัติของชีวมวลและการนำมาใช้ประโยชน์ ดังนี้

**แกลบข้าว (Rice Husk)** เป็นผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว เป็นเปลือกของข้าวสารเป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร เมล็ดมีลักษณะเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาล หรือเหลืองนวลแล้วแต่ภูมิภาคที่มีการปลูกข้าว ปัจจุบันประเทศมีการส่งออกแกลบข้าวรายใหญ่ของโลกนอกจากการนำแกลบข้าวไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่างๆเช่น ในกระบวนการแกสซิฟิเคชัน อัลดเชื้อเพลิงเป็นก้อน

แกลบมีจุดเด่นตรงที่มีความชื้นต่ำและมีขนาดเล็กเหมาะสมสำหรับทำเชื้อเพลิงนอกจากนี้ยังสามารถนำไปผสมกับวัสดุอื่นๆทำเป็นวัสดุก่อสร้างแล้ว แกลบข้าวยังถูกนำไปผลิตเป็นขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เพื่อนำขี้เถ้าแกลบไปใช้ประโยชน์อีกมาก ซึ่งส่วนประกอบหลักของขี้เถ้าแกลบ คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มากกว่าร้อยละ 90 สามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี และการเผาที่อุณหภูมิสูงซิลิกาในขี้เถ้าแกลบมีทั้งที่เป็น ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิการูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาวและซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีรูปร่างไม่เป็นผลึก (Non-crystalline Silica)

แกลบมีจุดด้อยคือมีปริมาณขี้เถ้าในสัดส่วนที่สูงร้อยละ 16-18 โดยน้ำหนักถือว่าค่อนข้างสูง ดังนั้น เมื่อเผาไหม้ให้ขี้เถ้าสูงอีกทั้งแกลบมีน้ำหนักเบา (1 ลบ.ม.หนัก 123 กก.) ทำให้การขนส่งได้ไม่มากนัก

**ฟางข้าว (Rice straw)** ฟางข้าวเป็นผลผลิตที่เหลือจากการเกี่ยวข้าวจากการปริมาณการปลูกข้าวว่า 70 ล้านไร่ และสามารถผลิตข้าว ปีละไม่ต่ำกว่า 21- 25 ล้านตัน และมีวัสดุเหลือที่เรียกว่าฟางข้าวและตอซังข้าว ประมาณ 3 เท่าของเมล็ดข้าว เมื่อคิดแล้วจะได้ฟางข้าวคืดและตอซังถึง 50-70 ล้านตัน จากจำนวนข้าวที่ผลิตได้ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย (คิดเป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่า 30,000 ล้านบาท) มีค่าความร้อนเทียบเท่าน้ำมันเตา 3,900 ล้านลิตร

**ขานอ้อย (Bagasse)** หมายถึงส่วนของลำต้นอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกแล้วมีส่วนประกอบอย่างหยาบๆคิดเป็นค่าร้อยละ โดยน้ำหนักของขานอ้อยเปียก(ความชื้นร้อยละ 48) คือ ขานอ้อยหรือไฟเบอร์ (Fiber) ร้อยละ 48.5 น้ำร้อยละ 48.0 น้ำตาลร้อยละ 3.0 และสารประกอบอื่นๆ นอกจากที่กล่าวแล้ว 0.5% ขานอ้อยใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ภายในโรงงานน้ำตาลนั่นเองขานอ้อยสามารถใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง(Fuel oil) ได้ดี ขานอ้อยที่มีความชื้นร้อยละ 50 หนัก 3 ตันเมื่อเผาจะให้พลังงานใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก 1 ตัน และยังใช้ผลิตวัสดุก่อสร้างโดยอาศัยกาว เช่น อัดเป็นแผ่น (Particle board) ไม้อัดผิวเส้นใย

(Fiber-overlaid plywood) และแผ่นกันความร้อน (Insulating board) ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ (Pulp) และกระดาษชนิดต่างๆ ฆานอ้อยส่วนใหญ่ ประกอบด้วยลิกนินและมีเซลลูโลสอยู่บ้างเล็กน้อย

ไฟเบอร์ของฆานอ้อยค่อนข้างสั้น คือ มีความยาวเฉลี่ยเพียง 1.4 มิลลิเมตรเท่านั้น ในขณะที่เยื่อใยของไม้ไผ่เฉลี่ย 2.5-4.0 มิลลิเมตรใช้เป็นอาหารสัตว์ ฆานอ้อยถ้าให้สัตว์กินโดยตรงมักจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับรสชาติการย่อยของสัตว์ตลอดจนมีอัตราส่วนค่าระหว่างอาหารที่สัตว์กินกับน้ำหนักตัวที่เพิ่ม วิธีที่ดีก็คือนำมาหมักก่อนที่จะให้สัตว์กินวัสดุที่หมักประกอบด้วยฆานอ้อย 1 ตัน (ความชื้นร้อยละ 55) โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักแห้ง กากน้ำตาลร้อยละ 15 ยูเรียร้อยละ 0.8 และข้าวโพดร้อยละ 12 โดยน้ำหนักผสมแล้วทำให้มีความชื้นประมาณร้อยละ 60 หมักไว้ 4-6 สัปดาห์ จึงให้สัตว์กินใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมผลิตทำปุ๋ยหมัก โดยหมักร่วมกับปุ๋ยคอกกากตะกอนหรือปุ๋ยวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้ยังใช้ปลูกอ้อยเพื่อรองรับมูลสัตว์และทำปุ๋ยหมักต่อไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อรักษาความชื้นของดินและป้องกันวัชพืช

กากตะกอนหรือจีตะกอน หมายถึงสิ่งเจือปนที่เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำอยู่ในน้ำอ้อย สิ่งเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกไปจากน้ำอ้อยในขบวนการทำใส (Clarification) กากตะกอนโดยทั่วไปมีลักษณะปนเป็นชิ้นเล็กๆ สีเทาเข้มส่วนประกอบของกากตะกอนไม่ค่อยแน่นอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพและความสะอาดของอ้อย ตลอดจนกรรมวิธีการผลิตของโรงงานนั้นด้วยกากตะกอนส่วนใหญ่มีน้ำประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักในส่วนที่เป็นของแข็งเป็นพวกสารอินทรีย์ที่ได้จากอ้อยและดินรวมทั้งมีไขมันอยู่ด้วย นอกจากนี้ก็มีน้ำตาลละลายอยู่บ้างการใช้ประโยชน์ของกากตะกอนมีดังนี้ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไซประมาณครึ่งหนึ่งของไซที่มีอยู่บนต้นอ้อยจะปะปนอยู่ในกากตะกอนประมาณกันว่าทุกๆ ตันของอ้อยที่เข้าหีบจะให้ไซประมาณ 450 กรัม ตัวเลขดังกล่าวแตกต่างกันไปตามพันธุ์อ้อยและบริเวณที่ปลูกไซที่ได้จากอ้อยสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น อุตสาหกรรมผลิตสารขัดเงา ผลิตหมึกสำหรับกระดาษคาร์บอน และผลิตลิปสติก เป็นต้น

กากน้ำตาล (Sugar residual) คือของเหลวที่มีลักษณะเป็นน้ำเชื่อมสีน้ำตาลเข้มของเหลวนี้จะถูกแยกออกจากเกล็ดน้ำตาลโดยวิธีปั่น (Centrifuge) ส่วนประกอบของกากน้ำตาลแตกต่างกันไปตามโรงงานอย่างไรก็ดีส่วนประกอบโดยประมาณคิดเป็นร้อยละตามน้ำหนักของกากน้ำตาลมีดังนี้คือน้ำ

ร้อยละ 17-25 น้ำตาลซูโครสร้อยละ 30-40 น้ำตาลกลูโคสร้อยละ 4-9 น้ำตาลฟรักโทสร้อยละ 5-12 นอกจากนี้ยังมีสารประกอบคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ สารประกอบไนโตรเจน กรดต่างๆ วิตามิน ไขมัน และแร่ธาตุต่างๆ อีกเป็นจำนวนมาก ดังนั้นกากน้ำตาลจึงใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางกว่าผลพลอยได้ชนิดอื่นทั้งหมดประโยชน์ที่ได้จากกากน้ำตาลมีมากมาย เช่น ใช้ทำปุ๋ย ใช้เลี้ยงสัตว์ใช้ผลิตอัลกอฮอล์ใช้ในอุตสาหกรรมยีสต์ ใช้ทำผงชูรส และใช้ทำกรดน้ำส้ม

**เศษไม้ (Wood residual)** สามารถนำไปใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ได้ หรือนำมาใช้ทดแทนน้ำมันเตา เช่น ปลายไม้ ปีกไม้และขี้เลื่อยของไม้ยางพาราโดยไม้ยางพารา 1 ไร่จะประกอบไปด้วยไม้ท่อน 30 ตัน ปลายไม้ 12 ตันและรากกิ่งไม้ 5 ตัน โดยเศษเหลือใช้จากไม้ท่อนได้แก่ ปีกไม้และขี้เลื่อย ปีกไม้คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 40-45 ของไม้ท่อน ขี้เลื่อยคิดเป็นร้อยละ 7-10 และจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไม้ จุดด้อยของเศษไม้คือมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 50 จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการอบ การย่อย เพื่อให้ความชื้นลดลงก่อนนำไปเผา

**เศษวัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมัน (Palm oil residual)** เศษวัสดุเหลือใช้จากปาล์ม น้ำมัน เป็นเชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีวัสดุเหลือใช้จำนวนมาก ได้แก่ทะลายปาล์ม ใบปาล์ม กะลาปาล์ม ลำต้น โดยสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมหรือทดแทนน้ำมันเตาโดยเฉพาะกะลาปาล์ม มีคาร์บอนที่สูง ค่าความร้อนที่สูงทำให้ราคาสูงตามไปด้วย กากปาล์มเป็นเศษเหลือจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากทะลายปาล์มสด มี 3 แบบคือ ไฟเบอร์มีลักษณะเป็นขุย กะลามีลักษณะเป็นคล้ายกะลามะพร้าวแต่มีขนาดเล็กกว่ามาก โดประมาณ 1-2 ซม.และทะลายปาล์มเปล่าจะได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมาตรฐาน ไฟเบอร์นำมาเป็นเชื้อเพลิง ในขบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ จึงมีเหลือไม่มาก

กะลาปาล์มมีค่าความร้อนสูงสุดเหมาะนำมาเป็นเชื้อเพลิงแต่ต้องระวังเศษน้ำมันที่ตกค้างอยู่ ส่วนทะลายปาล์มเปล่ามีเหลืออีกมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้ถ้านำมาเผาจะได้ขี้เถ้าที่มีแร่ธาตุโพตัสเซียมสูงมาก การที่จะนำทะลายปาล์มเปล่ามาเป็นเชื้อเพลิงต้องนำมาผ่านขบวนการย่อยหรือตัดก่อนเพราะมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบอัลคาไลน์สูงจะทำให้ท่อน้ำในหม้อน้ำมีเยื่อเหนียวเกาะติดได้ง่าย



ซึ่งข้าวโพด (Corn cobs) ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดมาใช้งานส่วนใหญ่ซึ่งที่เหลือนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในหม้อไอน้ำหรือเป็นวัตถุดิบในการผลิตแอลกอฮอล์ โดยให้ค่าความร้อนที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลตัวอื่นๆ

เศษวัสดุเหลือใช้จากมันสำปะหลัง (Cassava residual) การเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังสดนั้นพบว่ามีส่วนของลำต้นที่ติดกับส่วนของหัวมันสด หรือส่วนที่เรียกว่า เหง้ามันสำปะหลังเป็นส่วนที่แข็งของต้นมันสำปะหลัง ทำให้เกษตรกรต้องตัดทิ้งเป็นจำนวนมากเนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังดังกล่าวไม่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังได้ จากวิเคราะห์ค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังแห้ง พบว่ามีค่าความร้อนสูงถึง 3,500–4,058 แคลอรีต่อกรัม พอจะเทียบได้จากค่าความร้อนของไม้ฟืน หรือหากจะเทียบกับค่าความร้อนของน้ำมันเตาประมาณ 9,500 แคลอรีต่อลิตร (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณวาจกกสิกิจฯ, 2550)

ผักตบชวา (Water hyacinth) หรือ (Eichhornia crassipes) เป็นพืชที่เจริญอยู่บนผิวน้ำ จัดเป็นประเภทลอยน้ำ (Floating plant) โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดินจึงถูกกระแสน้ำพัดพาไปได้ไกลๆ แต่ถ้าน้ำตื้นแล้วรากจะหยั่งยึดติดกับพื้นดินได้ลักษณะทรงต้นประกอบด้วยกลุ่มของใบเรียงกันเป็นกระจุกในต้นหนึ่งๆจะมีใบตั้งแต่สองใบขึ้นไปที่โคนก้านใบจะมีกาบใบ (Sheath) ลักษณะเป็นเยื่อบางๆสีเขียวอ่อนๆแต่เมื่อมีอายุมากขึ้นก็จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลบริเวณของกาบใบเป็นสีน้ำตาลแกมม่วงจะเชื่อมติดต่อกันโดยมีไหล (Stolon) ซึ่งเป็นลำต้นที่ทอดไปตามผิวน้ำช่วยในการขยายตัวของผักตบชวาให้เพิ่มขึ้นต้นหนึ่งๆ หนึ่งผักตบชวาจะมีไหลแตกออกไปได้หลายอันเมื่อไหลแตกออกไปแล้ว ก็จะเจริญขึ้นเป็นต้นใหม่แต่ยังติดกับต้นเดิมอยู่และเกิดเป็นกอขึ้นพร้อมทั้งมีรากเกิดขึ้น รากของผักตบชวาเป็นแบบรากฝอย (Fibrous root) คือมีรากย่อยๆเป็นกระจุกรากที่แทงออกจะมีลักษณะอวบสีเขียว เมื่อมีอายุมากขึ้นจึงจะมีรากขนอ่อน ที่มีสีน้ำตาลอ่อน ใบเป็นแบบใบเดี่ยว (Simple leaf) ประกอบด้วย แผ่นใบ (Blade) และก้านใบ (Petiole) แผ่นใบมีลักษณะคล้ายรูปไต (Reniform) หรือคล้ายรูปหัวใจ (Cordate) มักมีความกว้างมากกว่ายาวหรือเกือบจะเท่าๆ กันเมื่อยังอ่อนปลายใบมักจะมน แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นปลายใบจะแหลมมีสีเขียวเข้มขึ้น ขอบใบเรียบระบบเส้นใบ (Venation) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและอาหารเป็นแบบเส้นใบขนาน ก้านใบมีลักษณะกลม เรียบ อวบน้ำลำต้นผักตบชวาเจริญอยู่ห่างๆกันลำต้นจะเล็กและก้านใบมักจะพองออกเป็น

ทูลอยน้ำ (ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Buoyancy leaf) แต่ถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ในที่เบียดชิดกันมาก โดยเฉพาะในน้ำนิ่ง ก้านใบจะไม่พอง นอกจากนั้น ก้านใบยังยาวมากบางแห่งพบว่ายาวถึงหนึ่งเมตรก็มีการเกิดใบอ่อน จะเกิดตรงกลางกอ โดยแผ่นใบของใบอ่อนจะม้วนหุ้มรอบโคนก้านใบใกล้เคียงและมีการคายน้ำหุ้มรอบอีกทีหนึ่ง ปลายก้านใบนี้ จะมีลักษณะคอดแล้วบานขอบหยักเล็กน้อยเป็นเยื่อบางๆ เมื่อใบอ่อนโตขึ้นก้านใบก็จะขยายขึ้นคั่นก้านใบที่ห่อหุ้มนั้นออกแผ่นใบก็จะค่อยคลี่เป็นอิสระจากโคนก้านใบเดิมในระยะแรกใบจะมีสีเขียวอ่อน ต่อไปจะมีสีเขียวเข้มขึ้นก้านใบนั้นก็ยังคงติดอยู่ตรงโคนก้านใบ

โดยทั่วๆ ผักตบชวาจะไม่สืบพันธุ์โดยเมล็ด นอกจากในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเช่น ในตอนที่น้ำแห้งในฤดูแล้ง ซึ่งต้นผักตบชวาแห้งตายหมด ครึ่งพอลถึงฤดูฝนเมล็ดที่พักตัวอยู่ในดินจะเริ่มงอกขึ้นมาเป็นต้นอ่อน และในไม่ช้าก็จะเจริญเติบโตขึ้น การสืบพันธุ์ของผักตบชวาที่พบเห็นอยู่ทั่วไป และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดก็คือ การแตกไหลแล้วกลายเป็นลำต้นติดอยู่กับต้นแม่เป็นจำนวนมาก จนเกิดเป็นกอใหญ่หลังจากที่ต้นอ่อนเกิดตากและใบของตนเองได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่วัน ต้นอ่อนเหล่านี้ก็จะเริ่มสร้างต้นอ่อนต่อไปเป็นช่วงที่สามได้มีผู้รายงานว่าต้นผักตบชวาเพียง 2 ต้น สามารถสร้างลูกหลานได้เป็นจำนวนถึง 300 ต้นภายในเวลาเพียง 20 วัน และเพิ่มเป็น 1200 ต้น ภายใน 4 เดือน แต่ในสภาพตามธรรมชาติ มีผู้สังเกตว่าผักตบชวาจะเพิ่มปริมาณเป็นสองเท่าภายใน 10 วัน ถ้าหากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ต้นผักตบชวา 10 ต้นจะสร้างลูกหลานได้ถึง 600,000 ต้น ครอบคลุมพื้นที่น้ำ 2.5 ไร่ ภายในเวลา 8 เดือน

กำลังผลิต (Productivity) ของผักตบชวาผักตบชวาเป็นพืชที่มีความสามารถพิเศษในการสร้างโครงสร้างของมันดียิ่งกว่าพืชอื่นๆ ทุกชนิดที่มีอยู่ในโลกนี้ ยกตัวอย่างเช่นในพื้นที่หนึ่งไร่ ผักตบชวาสามารถสร้างสารอินทรีย์ (แห้ง) ได้ถึง 24 ตันต่อปีในด้านความรวดเร็วในการเจริญเติบโต เราอาจจะสังเกตการณ์ยึดของก้านใบหรือไหลภายในเวลาเพียงชั่วโมงเดียว สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะความสามารถพิเศษในการสร้างอาหาร และเปลี่ยนเป็นโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยน้ำถึง 19 ส่วนต่อสารแห้งเพียงหนึ่งส่วน การที่โครงสร้างของผักตบชวาสดมีน้ำอยู่ถึง 95% นี้เองเป็นสาเหตุใหญ่ที่ผักตบชวาระบาดแผ่กระจายอาณาเขตในแหล่งน้ำได้อย่างรวดเร็วกว่าพืชอื่นๆ ทั้งหมดในโลก

### องค์ประกอบในผักตบชวา

ผักตบชวาประกอบด้วยเซลล์ลูโลส ลิกนินและแร่ธาตุอื่นๆ น้ำหนักแห้งโดยประมาณเฉลี่ยของผักตบชวาคิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมดองค์ประกอบของผักตบชวาแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของผักตบชวา (นันทนา, 2538)

องค์ประกอบ	สัดส่วน(ร้อยละ)
ลิกนิน	12-13
เซลล์ลูโลส	43-44
เพนโตซาน	14-15
ถั่ว	20-21
คาร์บอน	32-35
ไฮโดรเจน	5.4-5.8
ไนโตรเจน	2.8-3.5
โซเดียม	1.5-2.5
โปแตสเซียม	2.0-3.5
แคลเซียม	0.6-1.3

พืชชีวมวลเป็นอีกแหล่งพลังงานหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเนื่องจากมีปริมาณมากในแต่ละปี พลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปีมีค่าพลังงานเทียบเท่ากับถ่านหินลิกไนต์ 54 ล้านตัน (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549) เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์แสดงดังตารางที่ 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

Proximate analysis	Rice husk	Rice straw	Bagasse	Wood residual	Palm shell	Corn cob	Cassava residual
Moisture, (%)	12.00	10.00	50.73	45.00	12.00	40.00	59.40
Ash, (%)	12.65	10.39	1.43	1.59	3.50	0.90	1.50
VM, (%)	56.46	60.70	41.98	45.70	68.20	45.52	31.00
FC, (%)	18.88	18.90	5.86	7.71	16.30	13.68	8.10
<b>Ultimate analysis</b>							
C, (%)	37.48	38.17	21.33	25.58	44.44	28.19	18.76
H, (%)	4.41	5.02	3.06	3.19	5.01	3.36	2.48
O, (%)	33.27	35.52	23.29	24.48	34.70	37.42	17.50
N, (%)	0.17	0.58	0.12	0.14	0.28	0.12	0.32
S, (%)	0.04	0.09	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04
Cl, (%)	0.09	na	na	0.01	0.02	0.05	0.05
Ash, (%)	12.65	10.39	1.43	1.60	3.52	0.90	1.50
Moisture, (%)	12.00	10.00	50.73	45.00	12.00	40.00	59.40
<b>Other properties</b>							
Bulk density, kg/m <sup>3</sup>	150	125	120	450	400	na	250
HHV, MJ/kg	14.75	13.65	9.24	14.36	18.26	11.29	8.45
LHV, MJ/kg	13.52	12.33	7.37	12.60	16.90	9.60	7.45

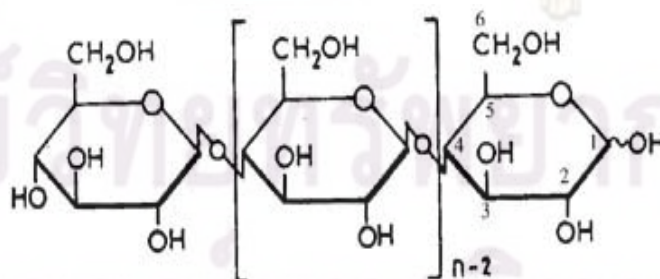
## 2.4 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides)

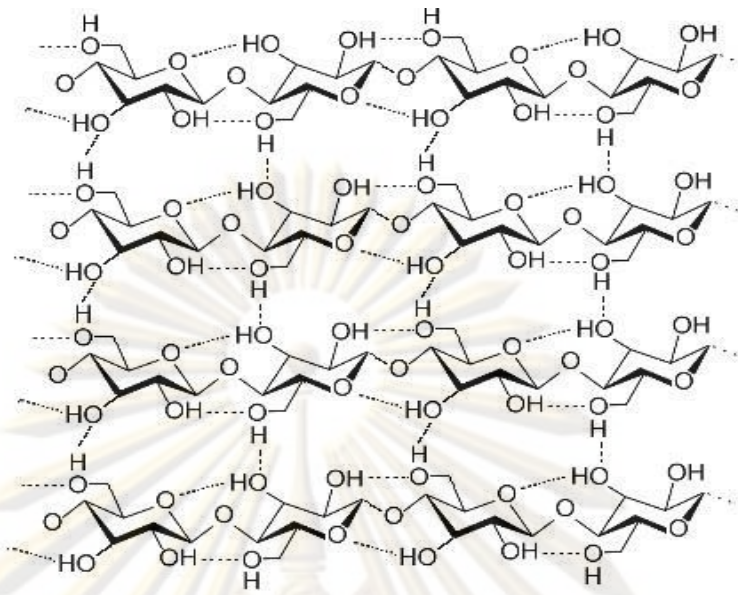
### 2.4.1 เซลลูโลส

เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืชและเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมากที่สุดประมาณร้อยละ 40-50 ของน้ำหนักแห้งเซลลูโลสพบได้ตามผนังเซลล์พืชทุกชนิดในชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) และผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) ทำให้พืชมีโครงสร้างที่แข็งแรง เซลลูโลสเป็นเส้นใยของพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลดีกลูโคส(D-glucose) ในรูปของเบต้า-ดีกลูโคไพราโนส ( $\beta$ -D-glucopyranose) หลายโมเลกุลกันประมาณ 2,000-10,000 หน่วยต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายลูกโซ่ แต่ละโมเลกุลจับกันด้วยพันธะ 1,4-ไกลโคซิดิก(1,4-glycosidic bond) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสโมเลกุลถัดไป

รูปแบบการจัดเรียงตัวของหน่วยดี-กลูโคสอยู่ในรูปลักษณะรูปเก้าอี้ (Chair form) แต่ละโมเลกุลในสายเซลลูโลสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวนของโมเลกุลถัดไปและเชื่อมต่อกันระหว่างสายเซลลูโลสที่ขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมระหว่างดี-กลูโคสในอีกสายหนึ่งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเส้นตรงไม่มีแขนงย่อย มีสูตรทั่วไปคือ  $-(C_6H_{10}O_5)_n$  เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยของดี-กลูโคสที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 หน่วยของดี-กลูโคสต่อ 1 โมเลกุลเซลลูโลสมีตั้งแต่ 15 หน่วยถึง 14,000 หน่วย น้ำหนักโมเลกุลมีค่า 50,000-2,500,000 คาลตัน ความยาวของหน่วยย่อยดี-กลูโคส 0.515 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 5 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างการจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลส

([http://www.nzetc.org/etexts/Bio19Tuat01/Bio19Tuat01\\_044a.jpg](http://www.nzetc.org/etexts/Bio19Tuat01/Bio19Tuat01_044a.jpg))

#### 2.4.2 เฮมิเซลลูโลส

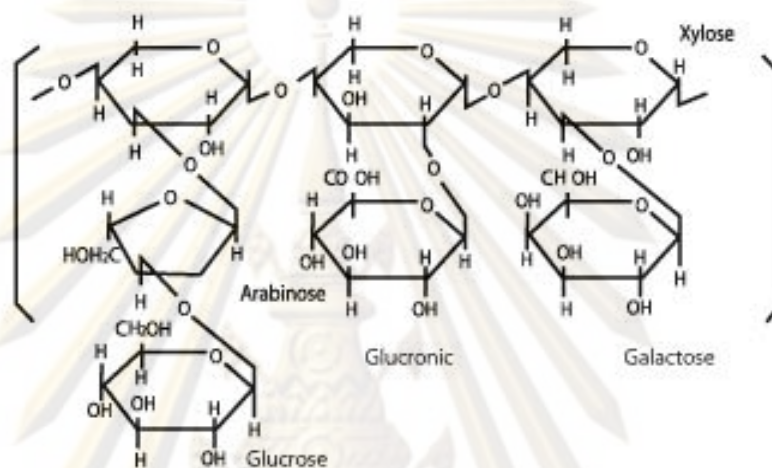
เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่จะอยู่ในรูปอสัณฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลส และมีมวลต่ำกว่ามากเซลลูโลสส่วนใหญ่จะเกิดจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว พวกดี-กลูโคส ส่วนเฮมิเซลลูโลสมักจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่างชนิดหลาย ๆ ตัวมาต่อกันเป็นกลุ่มดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างส่วนใหญ่จะคล้ายกับพวกเซลลูโลส ยกเว้นพวกพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย 50-200 หน่วย และต่อกันแบบกิ่งก้านสาขามากกว่าแบบเส้นตรง โดยส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ได้แก่ ดี-ไซเลน (D-xylane) ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลไซโลส (Xylose) หลายๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1,4-ไกลโคซิดิก (ระวีวรรณ, 2538; Ross, 1950)

สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (Heterogenous) ประกอบไปด้วยพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) หลายชนิดปนกัน ได้แก่

- เพนโตซาน (Pentosan) ส่วนใหญ่เป็นไซเลน (Xylane) และอะราเบน (Araban) เมื่อนำไปย่อยจะได้น้ำตาลไซโลสและอะราบินอส (Arabinose)

-เฮกโซแซน (Xsane) ส่วนใหญ่เป็นแมนแนน (Mannose) กาแลคแทน (Galactan) และกลูแคน (Glucan) เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส (Mannose) กาแลคโตส (Galactose) และกลูโคส

-พอลิยูโรนิก (Polyuronides) ส่วนมากเป็นสารประกอบกรดพอลิยูโรติก (Polyuronic acid) และกรดยูโรนิก (Uronic acid)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส ([www.tionbiotech.com/lentin1.htm](http://www.tionbiotech.com/lentin1.htm))

ข้อแตกต่างระหว่างเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลสคือ เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกย่อยด้วยสารละลายกรดเจือจางสามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 นอกจากนี้สายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะกิ่งก้านสาขามากกว่า สามารถดูดซับน้ำได้ดีและมีความยาวสายโซ่พอลิเมอร์สั้นกว่า โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคสมีสูตรโมเลกุล คือ  $-(C_6H_{12}O_5)_{2n}$

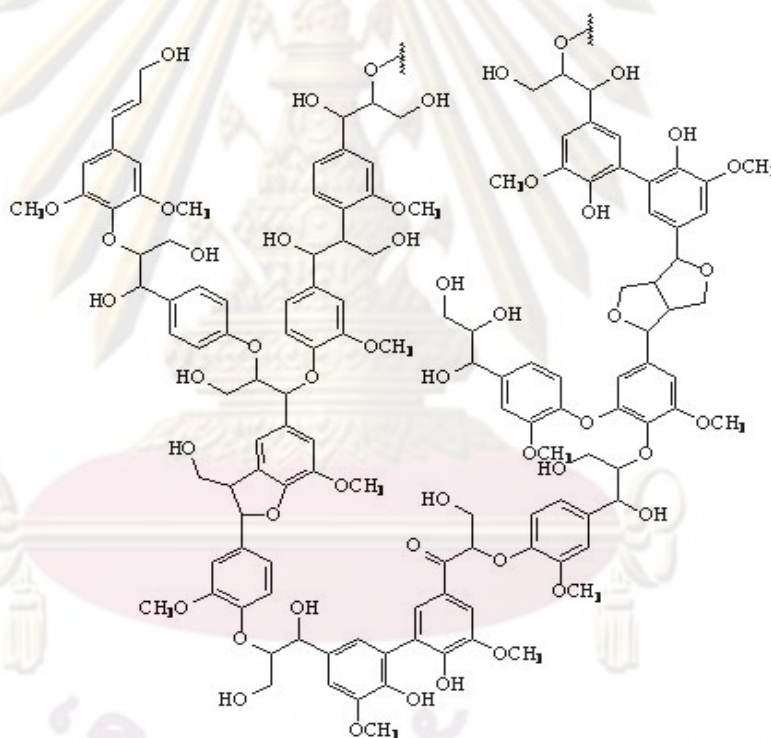
### 2.4.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบอโรมาติกเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง พบได้ในผนังเซลล์ของพืช รองลงมาจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนตัวเชื่อมประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงของเนื้อไม้ โดยประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด

โครงสร้างพื้นฐานของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane,  $C_6-C_3$ ) มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_9H_7.95$

$O_{2.4}(OCH_3)_{0.92}$  มีมวลโมเลกุลประมาณ 184 ต่อ 1 หน่วยมอนอเมอร์ (Othmer, 1981) โดย

สามารถแบ่งได้หน่วยย่อยของลิกนินได้ 3 ชนิดคือ p-Coumaryl alcohol, Coniferyl alcohol และ Sinapyl alcohol (Winkelemenn,1992) โดยการจัดเรียงตัวของธาตุในโครงสร้างของ โมเลกุลนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะแบบเดี่ยวแต่จะเกาะกันเป็นสายโซ่ยาวหลายแบบมีส่วนโครงสร้างที่สำคัญคือ ส่วนของโครงสร้างอโรมาติก (Aromatic structure) ที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซี (Methoxy group,  $-OCH_3$ ) เป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 14 หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group,  $-OH$ ) และมีหมู่ฟีนอลิก (Phenolic group) เป็นส่วนประกอบ (สมศักดิ์, 2528) โดยโครงสร้างของลิกนินในรูปที่ 2.4 ไม่ละลายน้ำ ไม่มีคุณสมบัติความยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นพืชที่มีลิกนินสูงจะมีความแข็งแรงทนทานสูง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน ([www.research.uky.edu/green\\_energy.html](http://www.research.uky.edu/green_energy.html))

## 2.5 โครงสร้างทางกายภาพชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิด โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นของแข็ง แต่รูปร่างจะแตกต่างกันไปตามชนิดของชีวมวลนอกจากนี้ ความชื้นและสิ่งเจือปนถือเป็นเอกลักษณ์ของชนิดนั้นๆ



### 2.5.1 ขนาดและรูปร่าง

มีหลากหลายแล้วแต่ว่าเป็นชีวมวลของพืชชนิดใด เช่น แกลบมีขนาดไม่เกิน 1 เซนติเมตร กะลาปล้ำม 2-3 เซนติเมตร ปีกไม้จากโรงเลื่อย 1 เมตร และชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมีสภาพเส้นยาว 10-20 เซนติเมตร เป็นต้น

### 2.5.2 ความชื้น

มวลในสภาพสดจะมีความชื้นสูงร้อยละ 50-60 ผักตบชวาร้อยละ 90-95 ทางปล้ำม ร้อยละ 80 ช้างข้าวโพดร้อยละ 50-60 แต่ชีวมวลที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำคือแกลบ เนื่องจากกระบวนการสีข้าว ข้าวเปลือกถูกลดความชื้นลงเหลือร้อยละ 12-14 เพื่อป้องกันการแตกหักของข้าวสาร ดังนั้นแกลบที่ได้จึงมีความชื้นต่ำกว่าข้าวเปลือก

### 2.5.3 สิ่งเจือปน

ชีวมวลมีสิ่งเจือปนและสิ่งแลกเปลี่ยนหลายอย่าง เช่น เศษดิน หิน ทราย เป็นต้น คราบน้ำมันปล้ำมที่ติดอยู่ทะลายปล้ำมเมื่อได้รับความร้อนสูงจะกลายเป็นของเหลวเหนียว เกาะติดในเตาเผา ส่งผลให้หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพที่ต่ำลงได้

## 2.6 ส่วนประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

### 2.6.1. ความชื้น (Moisture)

ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

### 2.6.2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

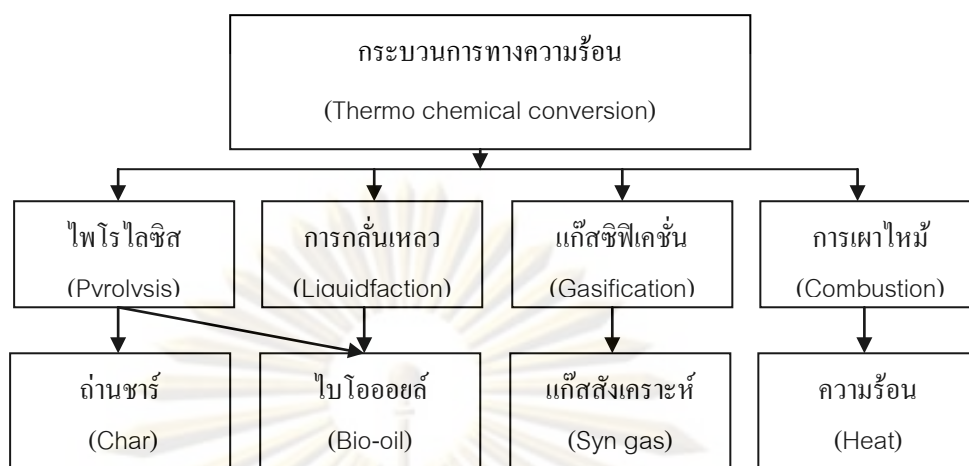
ส่วนที่เผาไหม้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles matter) และ คาร์บอน คงตัว (Fixed carbon) สารระเหย คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ง่าย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวเป็น ของแข็งที่เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่

### 2.6.3. ขี้เถ้า (Ash)

ขี้เถ้าคือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้น แกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งจะมีปัญหาการเผาไหม้และ กำจัดพอสมควร

## 2.7 หลักการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวล

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของพวกชีวมวลจะเห็นได้ว่า ชีวมวลสามารถที่จะแปรรูปไปเป็น เชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งอาจเป็นกระบวนการทางชีวภาพหรือกระบวนการ ทางเคมีความร้อนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ กระทำได้โดยใช้ เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis), แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification), ลิกวิฟแฟกชัน (Liquidfaction) และการเผาไหม้ (Combustion) ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการขึ้นอยู่กับ ภาวะที่ใช้ดำเนินการและผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 2.5 กระบวนการเปลี่ยน องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินการที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อ เทียบกับการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อน แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ทำให้กระบวนการทางเคมีโดยใช้ความร้อนน่าสนใจมากกว่าทั้งใน ด้านปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.5 กระบวนการแปรรูปทางความร้อน (Thermo chemical conversion)

### 2.7.1 ลิควิดแฟคชัน (Liquefaction)

เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) ผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหินทำได้โดยการแยกคาร์บอนออกหรือการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) เรียกกระบวนการนี้ว่า Liquefaction เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากถ่านหินสามารถนำมากลั่นในกระบวนการกลั่นน้ำมัน จะได้น้ำมันสำหรับรถยนต์ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น พลาสติก และสารละลายต่างๆ (Solvent) กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง (Direct liquefaction) เป็นการแปรรูปถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้กระบวนการเดียว (Single process) และการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยทางอ้อม (Indirect liquefaction) เป็นการนำถ่านหินมาผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สก่อน ในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงเหลวนี้ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ เวลา อุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา รวมถึงอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวได้รวดเร็วมีปริมาณมากขึ้น ภาวะที่ใช้ดำเนินการอยู่ที่ 350 ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 500 ถึง 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะและต้องให้อุณหภูมิเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการรวมตัวของโมเลกุลที่แตกตัวจากการให้ความร้อนกลายเป็นพอลิเมอร์

### 2.7.2 การเผาไหม้ (Combustion)

เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาวะที่ใช้ออกซิเจนโดยจะเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้าภาวะที่ใช้ดำเนินการ คือ อุณหภูมิตั้งแต่ 800-1400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศเกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการใช้อากาศเกินพอเกินไปจนทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (Potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือ คาร์บอน (C)

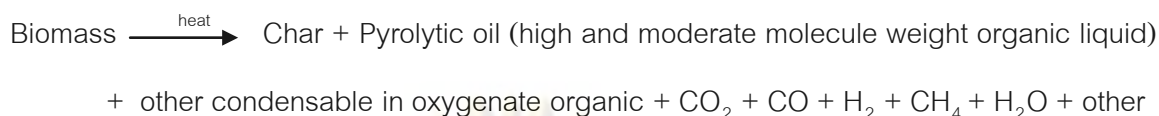
### 2.7.3 แก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนชีวมวลไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน โดยวัตถุดิบจะเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงโดยควบคุมปริมาณออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สสังเคราะห์ที่เรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาไหม้โดยตรงของเชื้อเพลิงเริ่มต้น มันสามารถเผาไหม้โดยตรงในภายในเครื่องยนต์หรือเปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้กระบวนการ Fischer-Tropsch แก๊สสามารถใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า กระบวนการ Fischer-Tropsch จะเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนไปเป็นไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe หรือ Co

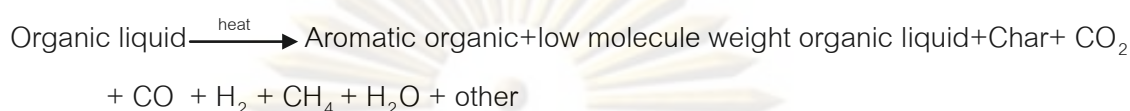
### 2.7.4 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) โดยไม่ใช้อากาศหรือออกซิเจนร่วมในปฏิกิริยา (ไม่ใช่ไอน้ำ ไฮโดรเจน หรือ คาร์บอนไดออกไซด์) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือของเหลว (ทาร์) ถ่านชาร์ และแก๊ส เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ได้แก่ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) ไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) ดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) คอนเดนเซชัน (Condensation) ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านชาร์ สารประกอบออร์แกนิก (Organic compound) แสดงดังสมการที่ ก และสมการ ข

(ก)



(ข)



โดยปริมาณการเกิดแก๊สและสารระเหยต่างๆจะแปรผันตามช่วงอุณหภูมิ โดยในช่วง 155-200 องศาเซลเซียสจะเป็นการระเหยของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 200-280 องศาเซลเซียสเป็นการระเหยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วงอุณหภูมิ 280-380 จะเป็นช่วงเริ่มการระเหยตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของแก๊สเมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

Process	Temperature (°C)	H <sub>2</sub> (mol%)	CO (mol%)	CO <sub>2</sub> (mol%)	HCs (mol%)
Elimination of water	155-200	0	30.5	68.0	2.0
Evolution carbon oxides	200-280	0.2	30.5	66.5	3.3
Start hydrocarbon evolution	280-380	5.5	20.5	35.5	36.6
Evolution of hydrocarbon	380-500	7.5	12.3	31.5	48.7
Dissociation	500-700	48.7	24.5	12.2	20.4
Evolution of hydrogen	700-900	80.7	9.6	0.4	8.7

Nikitin et al. (1962). "HCs are hydrocarbon"

การไพโรไลซิสแบ่งได้สองกระบวนการหลัก คือ การไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) และการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) โดยมีตัวแปรที่ต้องควบคุมดังนี้

- (1) ไพโรไลซิสแบบช้าเป็นการให้ความร้อนด้วยอัตรา 3-10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลผลิตหลักที่ได้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง (Char) เชื้อเพลิงเหลว (Bio-oil) และก๊าซได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน
- (2) ไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นการให้ความร้อนสูงในระยะเวลาอันรวดเร็ว โดยไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งอาจเรียกเทคโนโลยีนี้ให้ถูกต้องยิ่งขึ้นว่า "Thermolysis" กระบวนการนี้เป็นการทำให้วัสดุชีวมวลซึ่งมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร ความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 เกิดความร้อนอย่าง

รวดเร็วโดยอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10-50 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความ ร้อน (Resident time) น้อยมากในช่วง 0.5-2.0 วินาที และเกิดการแยกตัวออกเป็นถ่าน ก๊าซ ไอและ สารแขวนลอยในอากาศ เมื่ออุณหภูมิลดลงสารที่ระเหยง่ายจะกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เรียกว่า “Bio-Oil” ส่วนก๊าซที่ยังคงเหลืออยู่เป็นก๊าซที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ (Non condensable gas) และ มีค่าความร้อนปานกลางปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ไบ โอออยส์ร้อยละ 60-70 ถ่านชาร์ร้อยละ 12-15 และ แก๊สร้อยละ 13-25 นอกจากนี้ยังแบ่งกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่างๆ ได้อีก ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ประเภทการไพโรไลซิสแบบต่างๆ

Technology	Residence time	Heating rate	Temperature (°C)	Main product
Carbonization	Hour-days	Very low	300-500	Char
Pressurized carbonization	15 min-2 h	Medium	450	Char
Conventional pyrolysis	Hours	Low	400-600	Char, Liquids , Gas
Conventional pyrolysis	5-30 min	Medium	700-900	Char, Gas
Flash pyrolysis	0.1-2 s	High	400-650	Liquids
Flash pyrolysis	<1 s	High	650-900	Liquids , Gas
Flash pyrolysis	<1 s	Very high	1000-3000	Gases
Vacuum pyrolysis	2-30 s	Medium	350-450	Liquids
Hydropyrolysis	<10 s	High	<500	Liquids

Adapted from reference cited in this chapter and Bridgewater and Bridge (1991).

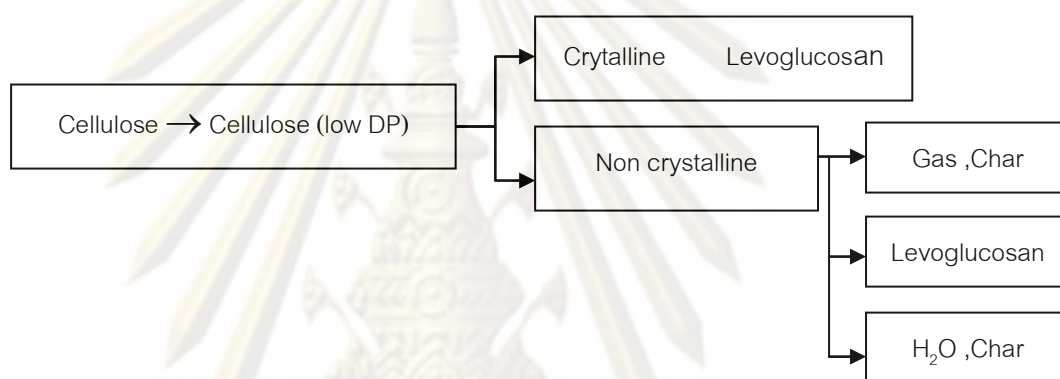
## 2.8 กลไกการไพโรไลซิส

### 2.8.1 เซลลูโลส

จากการศึกษาพบว่า กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง อุณหภูมิที่สำคัญ คือ

ช่วงอุณหภูมิต่ำ (<250 องศาเซลเซียส) ในช่วงเริ่มต้นของการไพโรไลซิสจะมีการแตกพันธะ ไกลโคซิดิก (Glycosidic) ที่บริเวณขอบเขตระหว่างโครงสร้างรูปผลึกและอสัณฐานด้วยอัตราการ

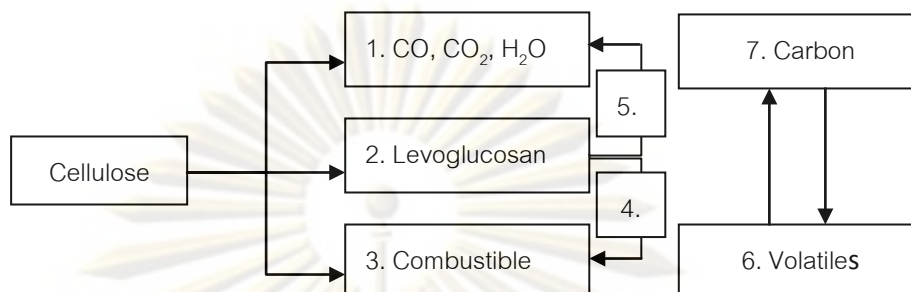
เกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ทำให้อัตราการพอลิเมอไรเซชันลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1000 หน่วยมาคงที่ประมาณ 200 หน่วยในโครงสร้างทั้งที่เป็นรูปผลึกและอสัณฐาน สายของพอลิเมอร์จะไม่จับตัวเข้าคู่กัน (Unzipping) ซึ่งในโครงสร้างรูปผลึกจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นพวงเลวโกลูโคซานส่วนในโครงสร้าง อสัณฐานจะมีการแตกของสายเซลลูโลส ที่เกิดการแยกตัวของอะตอมไฮโดรเจนจากอะตอมของคาร์บอน ทำให้มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง สายของพอลิเมอร์ทั้งสองจะมีส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง (Active site) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (Cross link) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ (Antal, 1982)

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (250-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดการแตกตัวของเซลลูโลสอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ และเกิดการสลายตัวแข่งกันของปฏิกิริยาคีพอลิเมอไรเซชันกับการไล่น้ำออก (Dehydration) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ตามปฏิกิริยาที่ 1 จะเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (Intermediate) ทำให้เกิดการไล่น้ำออกและเกิดชาร์ขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 ที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่วนปฏิกิริยาที่ 2 จะมีการแลกเปลี่ยนอิออนระหว่างพันธะไกลโคซิดิก (Tranoglucosylation) ทำให้เกิดเลวโกลูโคซานขึ้น โดยกลไกที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย 2 กลไกคือกลไกแรกจะเป็นการแตกพันธะไกลโคซิดิกแบบโฮโมไลติก (Homolytically) และเกิดการคีพอลิเมอไรเซชันตามกลไกของอนุมูลอิสระ (Free radical) กลไกที่สองจะมีการแตกพันธะแบบเฮเทอโรไลติก (Heterolytically) และเกิดการคีพอลิเมอไรเซชันของผลิตภัณฑ์ขั้นกลางของคาร์บอนเนียมไอออน (Carbonium ion) ในปฏิกิริยาที่ 3 เป็นการเกิดฟิชชัน (Fission) และการไม่เป็นสัดส่วนกัน (Disproportionation) ปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อปฏิกิริยาเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิ ช่วงเวลาให้

ความร้อน บรรยากาศแวดล้อม(ออกซิเจน น้ำ แก๊สเฉื่อย ตัวทำปฏิกิริยาอื่นๆ)องค์ประกอบและ  
 ธรรมชาติทางกายภาพของชีวมวล



รูปที่ 2.7 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลาง (Antal, 1982)

โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกลไกการสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลางเป็นปฏิกิริยาคาย  
 ความร้อน (Exothermic reaction) กระบวนการของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปฏิกิริยาคายความร้อนของเซลลูโลส (Donal, 1998)

Process	Reaction	Entalpy, KJ/Kg-mol carbon convert at <sup>a</sup>	
		300 K	1000K
Methanation	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-205	-226
	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-167	-192
Methanol formation	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$	-92	-105
	$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	-50	-71
Char formation	$0.17\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 \rightarrow \text{C} + 0.85\text{H}_2\text{O}$	-81	-80
Water gas shift	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-42	-33

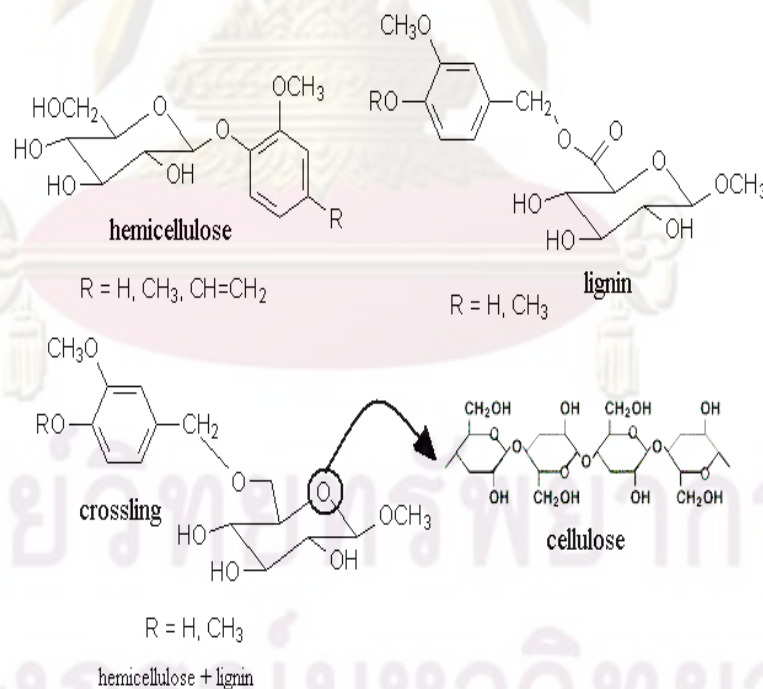
<sup>a</sup> The standard enthalpy of formation of cellulose was calculate from heat combustion

สำหรับกลไกการเกิดการสลายตัวของ โครงสร้างของชีวมวลอันได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส  
 และลิกนิน จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 2.8

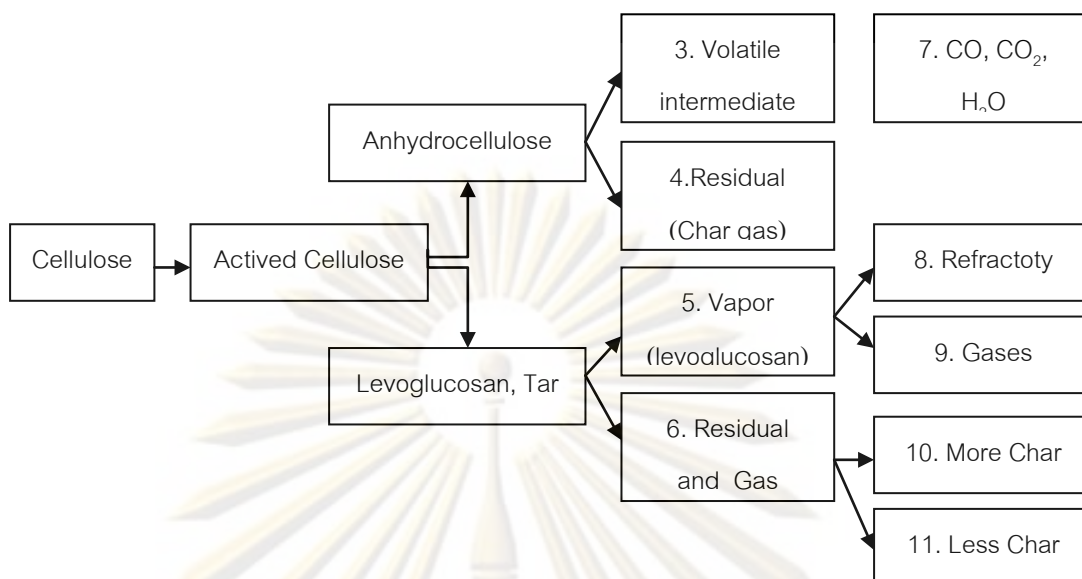
กลไกการเกิดปฏิกิริยา ฟรีแรดิคัล (Free radical mechanisms)



1. **ขั้นเริ่มต้น (initiations)** เกิดการแตกตัวของโมเลกุลได้ 2 แรดิคัล ภายใต้ปฏิกิริยาอย่างช้า  $\text{CH}_3\text{CH}_3 \rightarrow 2 \text{CH}_3\cdot$
2. **Propagation Hydrogen Abstraction** : จะมีการดึง Hydrogen มาจากโมเลกุลอื่นได้  $\text{CH}_3\cdot + \text{CH}_3\text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CH}_3\text{CH}_2\cdot$
3. **Radical Decomposition: free radical** เข้าไปในโมเลกุลทำให้เกิดการแยกสลายได้เป็นอัลคีน  $\text{CH}_3\text{CH}_2\cdot \rightarrow \text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{H}\cdot$
4. **Radical Addition:** มี radical จากโมเลกุลอื่นเพิ่มเข้ามาเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติก  $\text{CH}_3\text{CH}_2\cdot + \text{CH}_2=\text{CH}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\cdot$
5. **Termination:** 2 free radical ทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลที่สูญเสีย free radical ไป ทำให้เกิดปฏิกิริยา
  - Recombination:  $\text{CH}_3\cdot + \text{CH}_3\text{CH}_2\cdot \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$
  - Disproportionation :  $\text{CH}_3\text{CH}_2\cdot + \text{CH}_3\text{CH}_2\cdot \rightarrow \text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{CH}_3\text{CH}_3$
 ที่มา (Blogs.princeton.edu/.../01\_chemistry/)



รูปที่ 2.8 รูปแสดงกลไกการแตกตัวขององค์ประกอบชีวมวล



รูปที่ 2.9 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง (Antal, 1982)

ช่วงอุณหภูมิสูง (> 500 องศาเซลเซียส) กลไกการเกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงเป็นไปตามรูปที่ 2.9 เมื่อความดันสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 6 ได้ช้า ในขณะที่เกิดสารระเหยได้ผ่านปฏิกิริยาที่ 3 และ 5 จะต้องใช้ความดันต่ำลง การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง (Antal, 1982)

## 2.8.2 เสมิเซลลูโลส

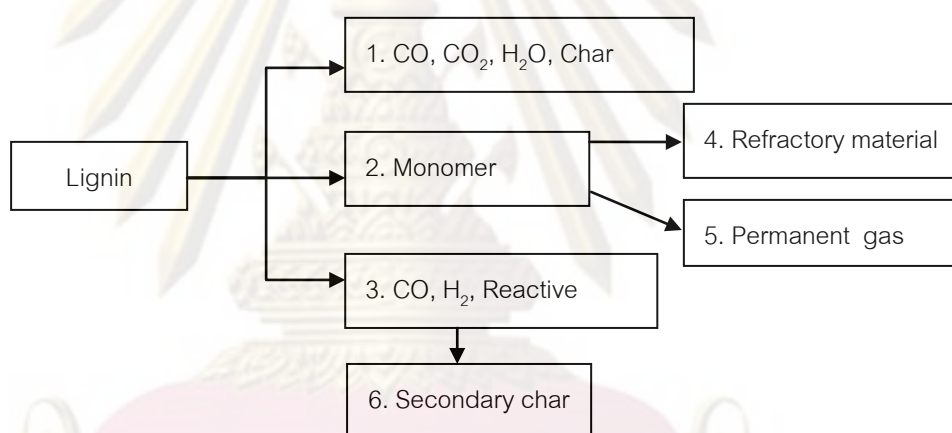
การไพโรไลซิสเสมิเซลลูโลสหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สมากกว่าและน้ำมันหรือน้อยกว่าเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาที่ทำให้ได้สารที่สามารถควบคุมได้จะพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับเซลลูโลส โดยกลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเสมิเซลลูโลสจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอน เริ่มจากการดีพอลิเมอร์เชชันไปเป็นพวกที่ละลายน้ำได้แล้วตามด้วยการสลายตัวไปเป็นสารระเหยได้โดยในช่วงแรกจะมีการแตกสลายพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมและออกซิเจนอะตอมไปเป็นเพนโตซาน (Pentosan) ที่จะนำไปสู่การเกิดกรดอะซิติก ฟอรั่มัลดีไฮด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่อาจมีผลกระทบต่อกรไพโรไลซิสของเซลลูโลสและลิกนิน

### 2.8.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็น โมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างต่าง ๆ มาประกอบรวมกันจึงทำให้มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้หลายทางที่จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้โดยการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งชนิดของชีวมวลและภาวะที่ใช้ในการทดลองจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก โครงสร้างของปฏิกิริยาเหล่านี้จะคล้ายกับการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลส

ช่วงอุณหภูมิต่ำ (< 240 องศาเซลเซียส) จะเกิดปฏิกิริยาการไล่น้ำออกตามปฏิกิริยาที่ 1 แล้วเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล ทำให้ได้ถ่านชาร์และแก๊สมากขึ้น

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (240-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดลิกนิน โมโนเมอร์ขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2 โดยที่อัตราการให้ความร้อนสูงและความดันต่ำจะทำให้เกิดโมโนเมอร์ของลิกนินได้ดี



รูปที่ 2.10 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน (Antal, 1982)

ช่วงอุณหภูมิสูง (> 500 องศาเซลเซียส) แบ่งการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 2 พวกคือ โมโนเมอร์ต่างๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ 2 จะเริ่มมีการแตกตัวในวัฏภาคไอและเกิดการไพโรไลซิสตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 การควบแน่นของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิต่ำตามปฏิกิริยาที่ 4 จะได้วัสดุทนไฟและสารที่ควบแน่นได้ขึ้นในขณะที่การแครกกิง (Cracking) ของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิสูงกว่าตามปฏิกิริยาที่ 5 จะได้พวกแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เมื่อถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะเกิดปฏิกิริยาที่ 3 และ 6 และเมื่อเกิดการควบแน่นของสารที่เหลืออยู่ในไอในภาวะอึดอัดยิ่งยวดจะเกิดชาร์ขึ้น ซึ่งการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวตามปฏิกิริยาที่ 3 และได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูง

## 2.9 ผลกระทบตัวแปรต่างๆต่อการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการไพโรไลซิสดังจะอธิบายต่อไปนี้ (ชูศักดิ์ โทกะนุทรานนท์, 2536)

### 2.9.1 องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่าง ๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะมีการแตกตัวของโพลีแซคคาไลด์ที่สายเชื่อมกลูโคสิดิก (Glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และซาร์จำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นซาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วน

ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะเป็นสิ่งกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณซาร์ และเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยตรง

### 2.9.2 อุณหภูมิในการไพโรไลซิส (Temperature)

ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200–300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง 300–500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวที่ปลดปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สามอุณหภูมิระหว่าง 500–800 องศาเซลเซียส จะมีการไต่ก๊าซออกอีกเป็นครั้งที่สองพร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของซาร์รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

การศึกษาอุณหภูมิในการไพโรไลซิสไม้ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าเริ่มเกิดการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสการเกิดระเหยของสารระเหยต่างๆร้อยละ 75 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาการไพโรไลซิสทั้งในด้านปริมาณและองค์ประกอบสารระเหยได้ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้น ปริมาณถ่านชาร์ลดลงและปริมาณแก๊สมากขึ้น (Maniatis, 1988)

นอกจากนี้การศึกษาการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ได้แก๊สเพิ่มมากขึ้นคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เพราะการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้นด้วย เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์จากปฏิกิริยาการแตกตัวขึ้นที่สองเพิ่มมากขึ้น เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นส่วนไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นจะลดลง ทำให้ปริมาณทาร์และชาร์ที่ได้ลดลงและมีการสะสมของคาร์บอน โดยการแตกตัวของสารระเหยบนพื้นผิวถ่านชาร์ที่ร้อน โดยปริมาณชาร์ไม่เกิดขึ้นมากในปฏิกิริยาขั้นต้น และแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้ (Non-condensable gas) มาจากการหลอมเหลวในขั้นแรกโดยไม่ผ่านถ่านชาร์ (Xianwen, 2000) นอกจากนี้สารระเหยที่ได้ออกมาจะมีปริมาณที่ไม่มากนัก และแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและสารประกอบออกไซด์ของคาร์บอน หลังจากนั้นขั้นที่สองที่เกิดขึ้นเป็นแก๊สซีพีเคชั่น ปล่อยแก๊สที่ไม่ควบแน่นโดยส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปถ่านชาร์ต่อไป

### 2.9.3 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสถานะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า 103–105 องศาเซลเซียสต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นชาร์ ส่วน

การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ซาร์จำนวนน้อยมาก

การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความเร็วเกินไปทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้มีมาก ถ่านซาร์น้อย และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นและของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้น (Zanzi, 1996) และโมเลกุลของน้ำมันที่ที่อยู่ในสภาวะแก๊สมีช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสั้นมากด้วยผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเกิดปฏิกิริยาน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้ายไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิและเวลาในการสลายตัวของถ่านซาร์น้อยทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและคุณสมบัติของน้ำมันที่ จึงได้ถ่าน มีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก แต่ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลง โดยอัตราเร็วในการเกิดแก๊สแต่ละชนิดไม่แตกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อนเนื่องจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบการทดลอง (Tanaka et al, 1997)

นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสในการเกิดถ่านซาร์ของชีวมวลมากกว่าถ่านหินเนื่องจากชีวมวลมีปริมาณเซลลูโลสสูง อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสของเซลลูโลส โดยเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเซลลูโลสและเกิดการดีพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลส โดยเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลลูโลสที่มีความอยู่ตัวมากขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านซาร์มากขึ้น แต่ถ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยอัตราการให้ความร้อนก็จะส่งผลต่อปฏิกิริยาน้อย เพราะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก

#### 2.9.4 ขนาดของอนุภาค (Particle size)

ขนาดของอนุภาคมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) คือ ขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวที่สูง (Surface area) ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไปเมื่อเกิดการสลายตัวขั้นแรกจะสลายตัวต่อไปยังขั้นที่สอง (Secondary cracking) ได้รวดเร็วมากทำให้ได้

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น แต่โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จากอนุภาคขนาดเล็กจะให้ผลมากกว่าจากอนุภาคขนาดใหญ่

### 2.9.5 ความดัน (Pressure)

ความดันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อปริมาณผลิตภัณฑ์สารระเหยได้ เนื่องจากเมื่อให้ความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้สารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณลดน้อยลง ในทางกลับกันถ้าให้ความดันต่ำจะทำให้ผลิตภัณฑ์สารระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) จะเกิดได้ดีที่ความดันสูง ทำให้เกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มมากขึ้นในขณะที่ให้ความดันต่ำปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นแก๊สลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลว น้ำมันทาร์ และถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น

### 2.9.6 สภาวะบรรยากาศ (Atmosphere)

ภาวะบรรยากาศของปฏิกิริยาการไพโรไลซิสที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาไพโรไลซิสในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนหรือที่เรียกว่าไฮโดรไพโรไลซิส (Hydropyrolysis) สามารถเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยได้ และช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้

### 2.9.7 เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Resident time)

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนมีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนน้อยไปเกินไปการสลายตัวก็จะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนมากเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของแก๊สเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสารระเหยต่างๆ จะเกิดการแตกตัวขึ้นที่ส่งต่อไปอีก และปริมาณถ่านชาร์จะมีแนวโน้มของร้อยละคาร์บอนในองค์ประกอบลดลงเนื่องจากสารระเหยมีปริมาณลดน้อยลงนั่นเอง

### 2.9.8 อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas)

อัตราการไหลของแก๊สตัวพามีผลต่อปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพามีค่าสูงจะทำให้แก๊สตัวพาจัดสารระเหยต่างๆออกจากห้องเผาไหม้ได้เร็วขึ้นการเกิดปฏิกิริยาอาจไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ปริมาณที่เป็น ทาร์ลดน้อยลงและถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

ต่ำเกินไปทำให้สารระเหยต่างๆอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นการแตกตัวขึ้นที่สองเกิดนานได้สารประกอบที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ทาร์และถ่านชาร์ลดน้อยลง

## 2.10 ผลกระทบที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำ และสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยองค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลกระทบที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลกระทบที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลกระทบหลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ (ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541)

### 2.10.1 ผลกระทบที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลิน แอนทราซีน และสารประกอบไฮซาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูน และซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานกลึงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

### 2.10.2 ผลกระทบที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวน แนฟทาลินเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C<sub>5</sub>-C<sub>6</sub> ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (Light oil) ช่วงอุณหภูมิ <math>< 200\text{ }^{\circ}\text{C}</math> ได้แก่ เบนซีน เบนโซลดิบ โทลูอิน เอทิลเบนซีน

- น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ  $200 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ได้แก่ ฟีนอล ไพรีดีน



- น้ำมันช่วงหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 °C ได้แก่ ไคเมททิล แนพทาซีน
- น้ำมันแอนทาซีน (Anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 °C ได้แก่ ฟลูออรีน พีแนพทิน
- พิตช์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิ >350 °C ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (Red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

### 2.10.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์และมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า แก๊สที่เผาไหม้ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนียในปริมาณเล็กน้อย

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของเหลวจากไพโรไลซิส

สมบัติทางกายภาพ	ไบโอออยล์	น้ำมันหนัก
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	15-30	0.1
ค่ากรด-เบส	2.5	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.2	0.94
องค์ประกอบของธาตุ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
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 (เมกะจูล/กิโลกรัม)	16-19	40
ค่าความหนืด (ที่ 50 องศาเซลเซียส) (เซนติสโตก)	40-100	180
ของแข็ง (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	0.2-1	1
ค่าของแข็งจากการกลั่น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	สูงกว่า 50	1

## 2.11 ไบโอดีเซล (Bio-oil)

ไบโอดีเซล โดยมีชื่อโดยทั่วไปว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันจากไพโรไลซิส น้ำมันดิบ ทาร์ ของเหลวจากไม้ น้ำมันจากไม้ คาร์บอนของเหลว ของที่กลั่นได้จากไม้และกรดที่ได้จากไพโรไลซิส คือ ของเหลวสีน้ำตาลดำ มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบโดยมีสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohols), อัลดีไฮด์ (Aldehydes), แอนไฮโดรซูการ์ (Anhydrosugars), ฟิวแรน (Furans), คีโตน (Ketones) และกรดอะซิติก (Acetic acid), (Boateng และคณะ) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบรวดเร็วโดยการแตกสายโซ่โพลีเมอร์ (Depolymerizing) ของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นแก๊สและการควบแน่นเป็นของเหลวทั้งที่เป็นน้ำมันเบา (Light oil) และน้ำมันหนัก (Heavy oil) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 2.8 และสมบัติด้านเคมีดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สมบัติทางเคมีของเหลวจากไพโรไลซิสเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา

Properties	Bio-oil	Diesel	Fuel oil
Heat of combustion			
BTU/lb	7100	22000	18200
MJ/L	19.5	42	39.4
Viscosity(censtokes)			
At 50°C	7	5	50
At 80°C	4	3	41
Ash content (wt%)	<0.02	<0.02	0.03
Sulfur content (wt%)	trace	<0.2	0.5-3
Nitrogen content (wt%)	trace	trace	0.3
Pour point (°C)	-33	30	-18
Turbine emission			
NO <sub>x</sub>	<0.7	<0.7	na
SO <sub>x</sub>	0	0.2	na

(วารสาร Power Engineering International, Volume 8 Issue 7, August 2000)

### การนำไบโอออยล์ไปประยุกต์ใช้ (Mohan, 2006)

- การผลิตพลังงานความร้อน ค่าความร้อนของไบโอออยล์ต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะมีสารประกอบที่มีหมู่ออกซิเจนและส่วนของน้ำ ไบโอออยล์คล้ายกับน้ำมันเบาในด้านสมบัติการเผาไหม้ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในด้านความหนืด ความเสถียร ค่าความเป็นกรด-เบส และระบบการปลดปล่อยแก๊สพิษ เป็นต้น การควบแน่นส่วนของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลสามารถช่วยกำจัดน้ำได้และทำให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์เพิ่มขึ้น
- การผลิตแก๊สสังเคราะห์ ชีวมวลและไบโอออยล์สามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นไฮโดรคาร์บอนสะอาดได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ชีวมวลแข็งและการใช้ไบโอออยล์เป็นสารป้อนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ พบว่าหากต้องการผลิตแก๊สสังเคราะห์ในปริมาณมากจากชีวมวลบางชนิดในรูปของของแข็งจะพบปัญหาของปริมาณเถ้าสูง แต่เมื่อใช้ไบโอออยล์เป็นสารป้อนซึ่งมีปริมาณเถ้าต่ำจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ และการขนส่งไบโอออยล์ก็สามารถใช้อุปกรณ์และพาหนะที่ใช้ขนส่งน้ำมันปิโตรเลียมได้ ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่ากรณีการขนส่งชีวมวลในรูปของแข็ง การแกซีฟิเคชันของไบโอออยล์โดยใช้ออกซิเจนร่วมทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์โทรปได้
- นอกจากนี้ไบโอออยล์ยังศักยภาพในการผลิตแก๊สสังเคราะห์หรือแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีเมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลแข็ง โดยน้ำมันหรือไบโอออยล์ที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อน 4.5-5.5 กรัมต่อชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30 มล./นาที ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สามารถแปรรูปเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ถึงร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สดังกล่าวประกอบด้วยแก๊สสังเคราะห์ร้อยละ 16-36 โดย

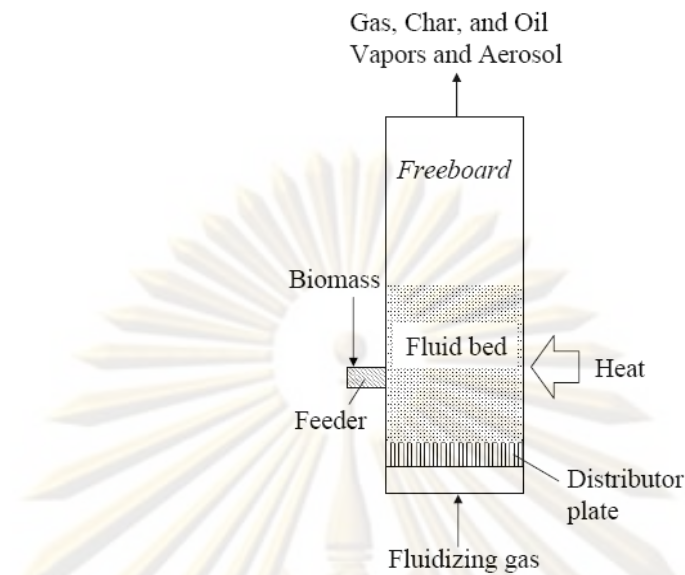
โมล มีเทนร้อยละ 19-27 โดยโมล และอีเทนร้อยละ 21-31 โดยโมล และมีค่าความร้อนรวมเท่ากับ 1300-1700 บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุตซึ่งมีค่าสูงกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ชีวมวลแข็งโดยตรง

- การผลิตกระแสไฟฟ้า ไบโอบอยล์มีข้อจำกัดในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์โดยตรงเพราะไบโอบอยล์มีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบปั๊มและระบบหัวฉีดภายในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมาพบว่าสามารถใช้ไบโอบอยล์กับเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นการนำไบโอบอยล์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของไบโอบอยล์ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

2.12 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ (Olofsson, 2005) เครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอบอยล์มี 5 ประเภท ได้แก่

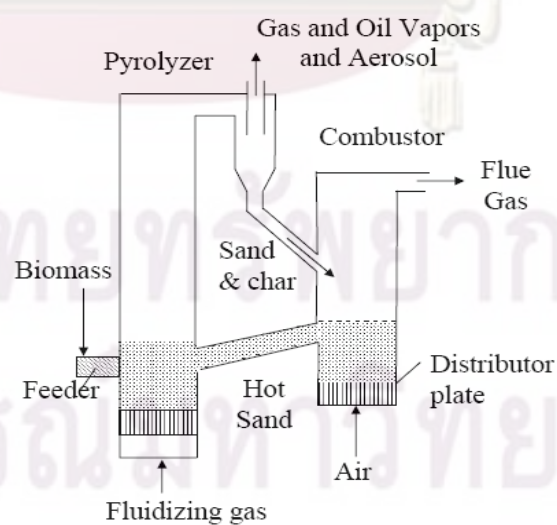
- เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ป้อนอากาศจากทางด้านล่างของเบด ความเร็วของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวขึ้นจนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสอย่างสม่ำเสมอ แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้นแล้วแทรกตัวขึ้นมาอยู่บนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ซึ่งขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย แสดงดังรูปที่ 2.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



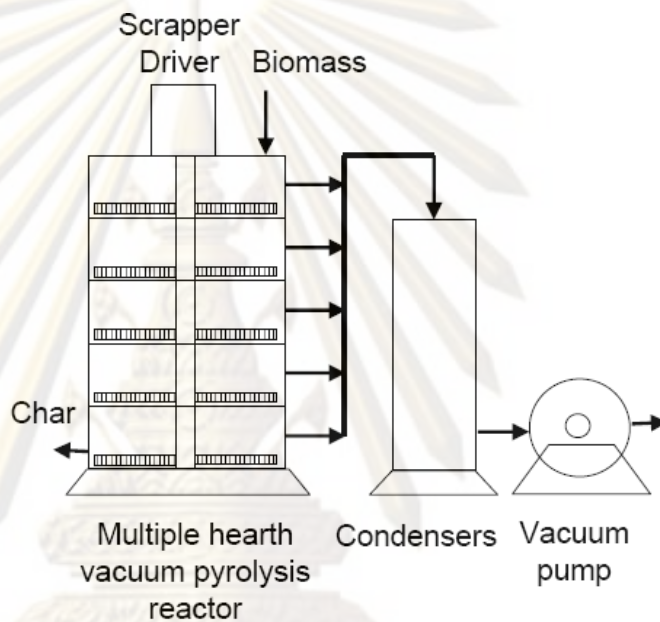
รูปที่ 2.11 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองอากาศ

- เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสน้ำที่พุ่งขึ้นจนเบดบางส่วนหลุดออกไป ดังนั้นจึงต้องติดตั้งไซโคลนเพื่อนำอนุภาคกลับมาในขณะที่แก๊สไหลผ่านไซโคลนออกไปทางด้านบนและกลับมาป้อนทางล่างเบดอีกครั้งแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน

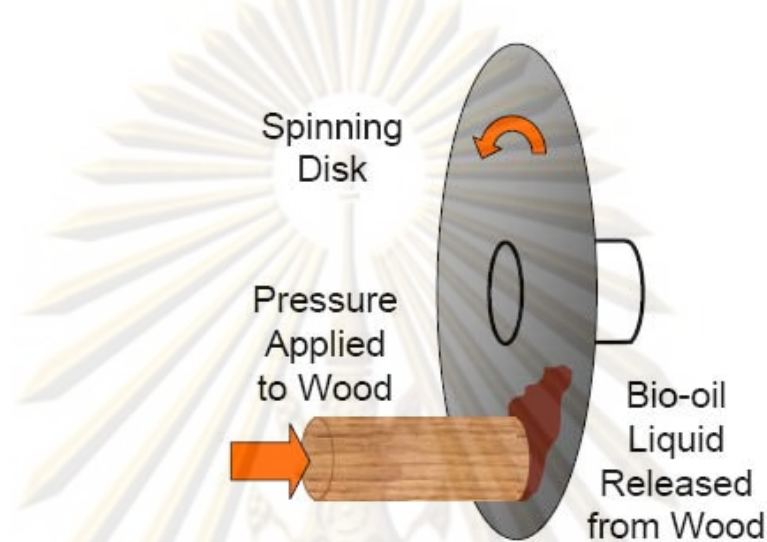
- เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการสลายตัวของชีวมวลภายใต้การลดความดันและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์นาน ซึ่งไม่เหมือนกับการไพโรไลซิสแบบเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวเป็นไอกับกรณีของการไพโรไลซิสแบบเร็วแล้วจะเกิดได้เร็วเหมือนกัน โดยความดันที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 15 กิโลปาสคาล แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ

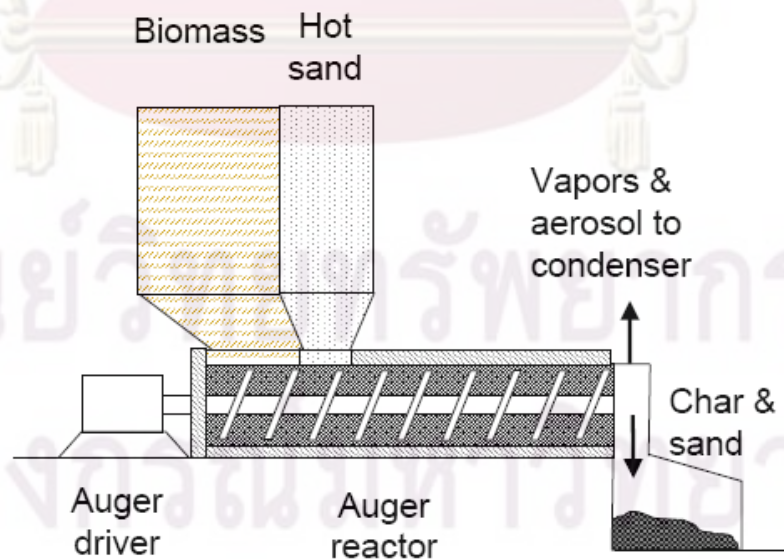
- เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่อนุภาคชีวมวลกระทบหรือเคลื่อนที่ไปชนกับของแข็งซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อน แอบลาทีฟไพโรไลซิสแตกต่างกับการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยวิธีอื่น ๆ โดยมีการจำกัดอัตราการถ่ายโอนความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งต้องใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก วิธีการเกิดปฏิกิริยาของแอบลาทีฟไพโรไลซิสคล้ายกับการหลอมเหลวในกระทะ โดยการเคลื่อนที่ของเนยบนพื้นผิวของกระทะที่ร้อนสามารถเพิ่มอัตราการหลอมเหลวของเนยได้ การถ่ายโอนความร้อนอย่างรวดเร็วนี้เกี่ยวข้องกับการสัมผัสกับพื้นผิวที่ให้ความร้อน ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน โดยจุดเด่นของกระบวนการแอบลาทีฟไพโรไลซิส คือ การให้ความดันสูงในการป้อนอนุภาคชีวมวล

บนผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่ร้อนซึ่งจะทำให้เกิดแรงหมุนเหวี่ยงหรือแรงเชิงกล อนุภาคชีวมวลจะเคลื่อนที่ชนกับผนังเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสจึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบแอบลาทีฟ

- เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (Auger reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ใช้แก๊สตัวพาและใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ทำงานแบบต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ไอที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบแน่นกลายเป็นไบโอดีเซล แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีหลายแบบหลายขนาดและมีตัวแปรเงื่อนไขในการใช้ที่ไม่เหมือนกัน เช่น ขนาดอนุภาค ลักษณะเฉพาะตัวเครื่อง หรือเทคโนโลยีที่ใช้งานง่าย ราคาที่แตกต่างกันสรุปได้ดังตารางที่ 2.9 และรูปที่ 2.16

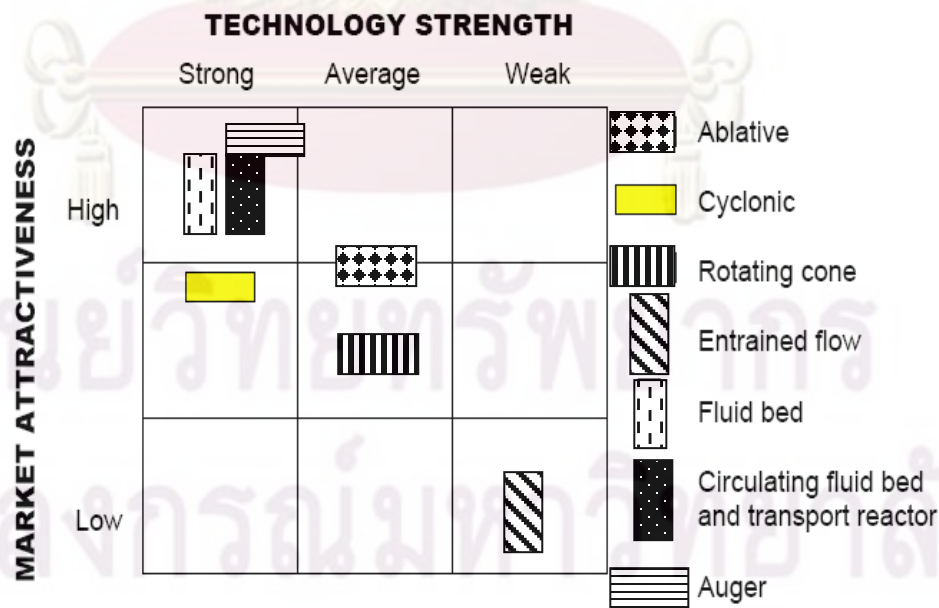
ตารางที่ 2.10 แสดงลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ

Property	Status	Bio-oil wt%	Complexity	Feed size	Inert gas need	Specific size	Scale up
Fluid bed	Demo	75	Medium	Small	High	Medium	Easy
CFB	Pilot	75	High	Medium	High	Large	Easy
Entrained	None	65	High	Small	High	Large	Easy
Rotating cone	Pilot	65	High	V small	Low	Small	Hard
Ablative	Lab	75	High	Large	Low	Small	Hard
Auger	Lab	65	Low	Small	Low	Medium	Easy
Vacuum	Demo	60	High	Large	Low	Large	Hard

The darker the cell color, the less desirable the process.

Lab: 1 – 20 kg h<sup>-1</sup>  
Pilot: 20 – 200 kg h<sup>-1</sup>  
Demo: 200 – 2000 kg h<sup>-1</sup>

ที่มา Adapted from PYNE IEA Bioenergy <http://www.pyne.co.uk>



รูปที่ 2.16 แสดงประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์และความสนใจใช้ในอุตสาหกรรม



## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nakorn และคณะ ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของฟางข้าว แกลบและซังข้าวโพด โดยใช้เทคนิค TG-MS ซึ่งให้ความสนใจกับแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส น้ำหนักที่หายไปและอัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จะต่างกันถึงแม้ว่าสารตัวอย่างนั้นจะมีองค์ประกอบของธาตุเหมือนกัน พบว่าจะได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลักในทุกๆตัวอย่าง โดยอัตราการเกิดแก๊สของสารตัวอย่างแต่ละตัวจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน ซึ่งพบว่าเซลลูโลสและลิกนินจะทำปฏิกิริยากันระหว่างการเกิดไพโรไลซิส ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ลดลง แต่ปริมาณชาร์เพิ่มขึ้น จากข้อมูลของแก๊สที่ได้และการวิเคราะห์ชาร์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าองค์ประกอบทั้งสองสามารถกำจัดคาร์บอนในกระบวนการไพโรไลซิสได้ อันเนื่องมาจากผลของการเกิดปฏิกิริยา cross-link ระหว่างเซลลูโลสและ ลิกนิน ไปเป็นน้ำและหมู่เอสเทอร์ในกระบวนการไพโรไลซิส

Ayse E. Putun และคณะ ศึกษาถึงภาวะการไพโรไลซิสของฟางข้าวที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ได้แก่ อัตราความร้อน 5 เคลวิน/นาทึ อุณหภูมิที่ใช้ขนาดของอนุภาค อัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของกระแสไอน้ำ ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 673, 773, 823 และ 973 เคลวิน ที่อุณหภูมิ 823 เคลวินให้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดที่ 27.26 เปอร์เซ็นต์ ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.425-0.85 มิลลิเมตร ปริมาณไบโอออยล์ที่ได้ 27.77 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ที่ 200 มิลลิลิตร/นาทึ ความเร็วของไอน้ำอยู่ที่ 2.7เซนติเมตร/วินาที

Zheng Ji-lu และคณะ ไพโรไลซิสต้นฝ้ายแบบเร็วที่อุณหภูมิ 480 ถึง 530 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูได์เบด ได้ไบโอออยล์เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ผลการทดลองได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดที่ 55 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีแมสสเปกโตรเมทรี-แก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยน้ำ กรดและสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก วิเคราะห์ค่าความร้อนอยู่ที่ 17.77 เมกกะจูล/กิโลกรัม ความคงตัว การละลายและการกักความร้อนมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซล สามารถนำไปใช้การเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ หรือ เตาเผา หรือนำไปกลั่นแยกใช้ในยานพาหนะ นอกจากนี้ทำการปรับปรุงระบบในการไพโรไลซิส โดยมีตัวป้อนสารสองชั้นเพื่อป้องกันการอุดตันทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Lu Qiang และคณะ ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากแกลบศึกษาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 550 องศาเซลเซียส โดยได้ปริมาณไบโอดีเซลสูงสุด 50 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดยวิธี อินดักทีฟ-คัพเปิลพลาสมา อะตอมมิก แอปซอร์บชัน สเปกโทรเมตรี วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่าประกอบไปด้วยสารต่างๆมากกว่า 50 ชนิด เช่น กรด แอลกอฮอล์ คีโตน ฟีนอล เอสเทอร์ อัลดีไฮด์ ฟิวแรน และเมื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ความหนืด การคงสภาพ การหล่อลื่น การสึกหรอ จะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

M. Asadullah และคณะศึกษาการไพโรไลซิสของกากขานอ้อยในระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยศึกษาที่อุณหภูมิต่างกันในช่วง 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส ไบโอดีเซลที่ได้เก็บที่คอนเดนเซอร์ สองส่วนที่อุณหภูมิต่างกัน ปริมาณไบโอดีเซลสูงสุดที่ได้ 66 เปอร์เซ็นต์ แก๊สที่ไม่สามารถระเหยได้จะประกอบไปด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน โพรเพน และโพรพีน ความหนาแน่นและความหนืดอยู่ที่ 1130 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ 19.32 เซนติพอยส์ สำหรับไบโอดีเซลที่ได้จากส่วนที่หนึ่งและ 1050 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ 4.25 เซนติพอยส์ สำหรับไบโอดีเซลที่ได้จากส่วนที่สอง ค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 17.25, pH 3.5 และ 19.91 เมกกะจูล/กิโลกรัม pH อยู่ที่ 4.5 ตามลำดับ

สินีนากู รอดจัน ศึกษาการไพโรไลซิสของชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไรเซอร์ 2.5 เซนติเมตร สูง 165 เซนติเมตร โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 650-850 องศาเซลเซียส ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมช่วง 0-100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ช่วง 1-5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาช่วง 5-9 พบว่าเมื่อร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสม ร้อยละของปฏิกิริยาที่ใช้ และร้อยละนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนแก๊สมีเทนลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะที่สภาวะอุณหภูมิเหมาะสมคือ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมเท่ากับ 100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เท่ากับ 5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 9 โดยได้ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 52.0 และ 18.0 ตามลำดับ

Lee และคณะ ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา การปรับสภาพ และระบบการกำจัดถ่านชาร์ต่อการผลิตไบโอดีเซลจากฟางข้าวโดยการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลสูงที่สุด คือ 410-510 องศาเซลเซียส ไบโอดีเซลที่ได้มีปริมาณโลหะอัลคาไลต่ำ โดยส่วนใหญ่จะติดออกมาจากการกำจัดถ่านชาร์และการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นจะเพิ่มการลดปริมาณโลหะอัลคาไล การปรับสภาพทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์ ปลอดภัยและเพิ่มมูลค่าได้ง่าย ไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น น้ำมันดีเซลหรือเชื้อเพลิงในการพัฒนา โดยสามารถใช้โดยตรงหรือผสมกับเชื้อเพลิงทางการค้า ข้อดีของการประยุกต์ใช้ไบโอดีเซลไปเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีกำมะถัน ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนที่อุณหภูมิสูงปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและแก๊สอื่น ๆ รวมถึงค่าความร้อนจะสูงขึ้น และผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 15 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยสามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานหรือใช้เป็นตัวดูดซับแก๊ส ได้แก่ แอมโมเนีย

Lu และคณะ ศึกษาสมบัติเชิงเคมีและสมบัติเชิงกายภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสเปลือกข้าวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว พบว่าไบโอดีเซลที่ได้มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและธาตุอินทรีย์ การไหลจะเป็นการไหลแบบไม่เป็นนิวโตเนียน ไบโอดีเซลไม่เสถียรต่อความร้อน การเติมเมทานอลจะเพิ่มความเสถียรกับไบโอดีเซล มีปริมาณน้ำ ของแข็งและเถ้าสูง มีสมบัติในการกัดกร่อน มีความเป็นพิษ และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการเพิ่มประสิทธิภาพก่อนนำไปใช้จริง

Su และคณะ ศึกษาการไพโรไลซิสของฟางข้าวและกากไม้ไผ่โดยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่ประกอบด้วยระบบแยกถ่านชาร์ และศึกษาถึงอิทธิพลของปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆที่มีต่อผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของระบบการแยกถ่านชาร์ ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพได้ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 415-540 องศาเซลเซียสสำหรับฟางข้าว และช่วงอุณหภูมิ 350-510 องศาเซลเซียสสำหรับกากไม้ไผ่ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง, อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง และชนิดของก๊าซตัวพา ผลการวิจัยพบว่า ช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพคือ 440-500 องศาเซลเซียสสำหรับฟางข้าว

และ 405-440 องศาเซลเซียสสำหรับกากไม้ไฟ และจากผลการทดลองของกากไม้ไฟปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพอยู่ที่มากกว่า 70% ของน้ำหนักกากไม้ไฟ ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง, อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง พบว่าเมื่อให้อัตราของสารป้อนเร็วและขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้ได้ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพมากกว่า และการใช้ก๊าซผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซตัวพา จะทำให้ปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพมีมากขึ้น องค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพ ประกอบไปด้วย ฟีนอลิก (Phenolics), เฟออร์ฟูรอล (Furfura), กรกอะซิติก (Acetic acid), เลโวกลูโคซาน (Levoglucosan), กัวไกลคอลล (Guaiacol), อัลคิล กัวไกลคอลล (Alkyl guaiacol), คีโตน (Ketones) และอัลดีไฮด์ (Aldehydes) นอกจากนี้การทดลองยังสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพคุณภาพสูง ซึ่งมีความเข้มข้นของโลหะแอลคาไลน์ และแอลคาไลน์เอิร์ธต่ำ แสดงให้เห็นระบบแยกถ่านชาร์มีประสิทธิภาพดี

Sensoz และคณะศึกษาไพโรไลซิสของเมล็ดดอกคำฝอยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในส่วน of โครงสร้างของไบโอออยล์ที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยนำเมล็ดดอกคำฝอยอัดเป็นแผ่นเล็กขนาด 1.8 มิลลิเมตร ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ความร้อน 10, 30, 50 องศาเซลเซียสต่อเวลาที่ที่บรรยากาศออกซิเจน และ 50 องศาเซลเซียสต่อเวลาที่ที่ภาวะแก๊สไนโตรเจน ได้เป็นผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 36.84, 36.42, 36.84 และ 36.00 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนทำให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 1.50, 1.32, 1.55 สูงกว่าแก๊สไนโตรเจนที่มีค่าเท่ากับ 1.13 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Catalytic reforming ของแอลกอฮอล์และสารอะโรมาติกที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ให้เปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อนำไบโอออยล์มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคลิควิดโครมาโทกราฟี พบว่ามีส่วนที่เป็น Asphaltene ร้อยละ 50-62.5 และ n- Pentane soluble ร้อยละ 37.5-50.0 โดยน้ำหนัก ยังมีส่วนที่เป็นโทลูอินและเมทานอล จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีหมู่ของ O-H stretching ที่ช่วง 3200 และ 3400  $\text{cm}^{-1}$  C=O stretching ที่ช่วง 1700 และ 1750  $\text{cm}^{-1}$  ของหมู่คีโตนและหมู่อัลดีไฮด์ จากการวิเคราะห์ทางเทคนิค  $^1\text{H}$  NMR พบ Aromatic hydrogen resonance ในช่วง 6.5-9.0 พีพีเอ็ม และ Aliphatic hydrogen resonance 0.5-6.5 พีพีเอ็ม จากการวิเคราะห์ทางเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบ  $\text{C}_{15}$ - $\text{C}_{36}$  ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1079 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความหนืดเท่ากับ 225 เซนติสโตกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และมีจุดวาบไฟ 58 องศาเซลเซียส

### บทที่ 3

#### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

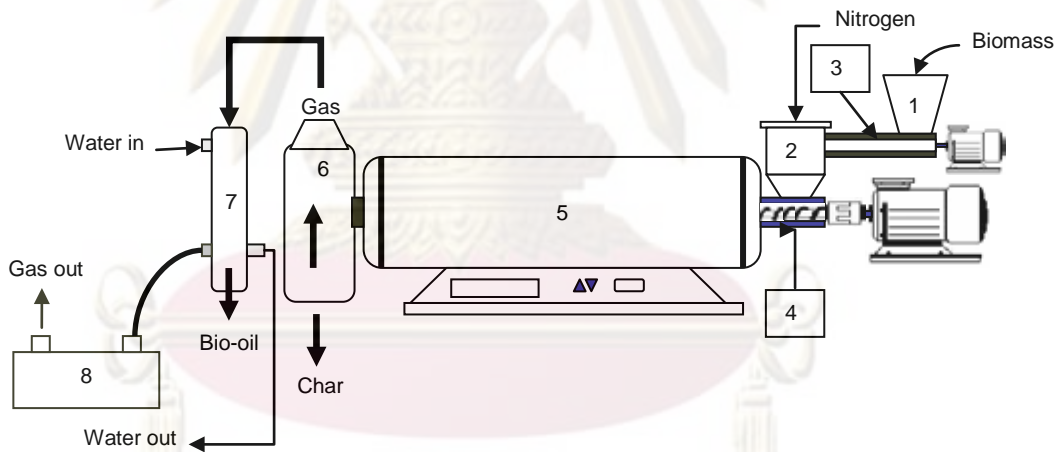
3.1.1.1. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ

3.1.1.2. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด

3.1.1.3. เตาอบ (oven)

3.1.1.4. เครื่องคัดขนาดและตะแกรงร่อนขนาด 425, 600 ไมโครเมตรและ 1 มิลลิเมตร

##### 3.1.2 ชุดการทดลองไพโรไลซิสเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

- หมายเลข 1 ตัวเก็บสาร (Hopper 1)
- หมายเลข 2 ตัวเก็บสาร (Hopper 2)
- หมายเลข 3 ชุดสกรู (Screw feeder 1) ขนาดยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร
- หมายเลข 4 ชุดสกรู (Screw feeder 2) ขนาดยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร
- หมายเลข 5 เต้าเผา (Tube furnace)
- หมายเลข 6 ตัวแยกสาร (Separator)
- หมายเลข 7 ตัวควบแน่นสาร (Condenser)
- หมายเลข 8 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

3.1.3 เครื่อง Pyris Diamond TG/DTA, Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer เครื่อง TG/DTA เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน หรือพฤติกรรมทางความร้อนของผักตบชวา ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer

#### 3.1.4 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (Micro Gas Chromatography)

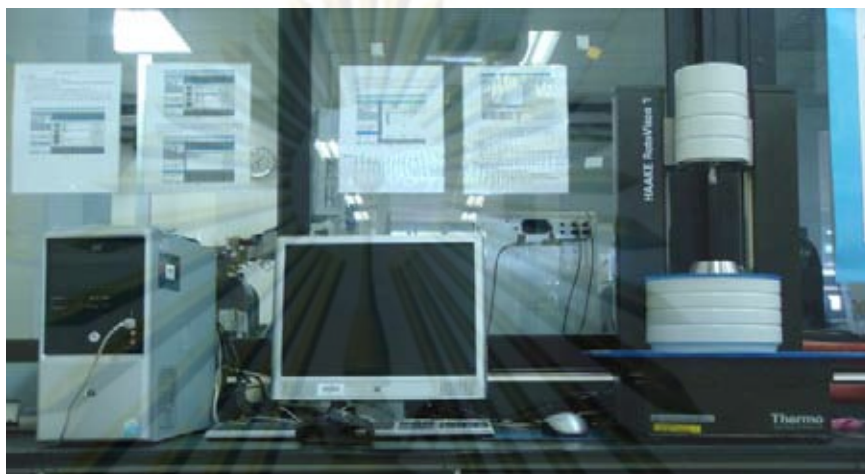
เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเครื่องศึกษาองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส ยี่ห้อ SHIMADZU



รูปที่ 3.4 เครื่อง Gas Chromatography

### 3.1.5 เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer)

เป็นเครื่องที่ศึกษาวัดความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิส



รูปที่ 3.5 เครื่อง Rheometer (ยี่ห้อ Haake Roto visco1)

### 3.1.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph with Mass Spectrometer), GC-MS เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น CP-3800 ยี่ห้อ VARIAN เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph with Mass Spectrometer, GC-MS)



### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.2.1 ผักตบชวาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 425 ไมโครเมตร, 425-600 ไมโครเมตร และ 600 ไมโครเมตร-1 มิลลิเมตร
- 3.2.1 แก๊สไนโตรเจน 99.50% จากบริษัท แพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 3.2.1 เตตระไฮโดรฟูราน (Tetra Hydro Furan, THF)

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมชีวมวล

- 3.3.1.1 เตรียมผักตบชวาบดละเอียดมีขนาด น้อยกว่า 425 ไมโครเมตร, 425-600 ไมโครเมตรและ 600 ไมโครเมตร-1 มิลลิเมตร
- 3.3.1.2 อบผักตบชวานาน 6 ชั่วโมงให้มีความชื้นน้อยกว่า 5 %
- 3.3.1.3 นำผักตบชวาไปวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis, ASTM D 3173-3175)
- 3.3.1.4 วิเคราะห์โดยแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D 3176-89)
- 3.3.1.5 ค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177 Method B)
- 3.3.1.6 การสูญเสียน้ำหนักผักตบชวาซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและอุณหภูมิด้วยเครื่อง Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer (TG/DTA)
- 3.3.1.7 หาธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในผักตบชวา

#### 3.3.2 ดำเนินการทดลอง

- 3.3.2.1 เปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศออกจากระบบเป็นเวลา 10-15 นาที
- 3.3.2.2 เปิดเตาเผาโดยศึกษาที่อุณหภูมิ 400, 425, 450, 475 และ 500 องศาเซลเซียส
- 3.3.2.3 ปรับความเร็วสกรูเพื่อทำการป้อนสารจำนวน 200 กรัม ขนาดอนุภาคแรกเริ่ม 250-600 ไมโครเมตร ที่อัตราการป้อนสาร 1.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (สกรูหมุน 175 รอบ/นาที)

- 3.3.2.4 เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านตัวควบแน่นสาร
- 3.3.2.5 เก็บตัวอย่างน้ำมัน ถ่านชาร์และแก๊สที่ได้
- 3.3.2.6 คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง
- 3.3.2.7 ทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมัน ได้แก่
  - อุณหภูมิในช่วง 400, 425, 450, 475 และ 500 องศาเซลเซียส
  - ขนาดอนุภาคสามช่วงอนุภาคน้อยกว่า 425 ไมโครเมตร, 425-600 ไมโครเมตรและ 600 ไมโครเมตร-1 มิลลิเมตร
  - อัตราการป้อนสารที่
  - อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพาที่ 0, 50, 100, 200, 400 และมากกว่า 400 มิลลิลิตร/นาที
- 3.2.2.8 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3.2.2.1-3.2.2.6

#### 3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองของผลิตภัณฑ์

- 3.4.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมี
  - 3.4.1.1 วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์
  - 3.4.1.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันและถ่านชาร์
  - 3.4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR spectroscopy
  - 3.4.1.4 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)
  - 3.4.1.5 วิเคราะห์ธาตุโลหะของถ่านชาร์
  - 3.4.1.6 วิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)
- 3.4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทั่วไป
  - 3.4.2.1 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer
  - 3.4.2.2 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point) มาตรฐาน ASTM D 93
  - 3.4.2.3 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)
  - 3.4.2.4 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (Corrosivity) มาตรฐาน ASTM D1130

3.4.2.5 วิเคราะห์สภาพการละลาย (Solubility)

3.4.2.6 วิเคราะห์ปริมาณกำไ้น้ำมัน ASTM D 524-04

3.4.2.7 วิเคราะห์ปริมาณกากคาร์บอน ASTM D 482-95

3.4.3 การคำนวณร้อยละผลได้จากทดลอง

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว (\% Liquid yield)} = 100 \times \left[ \frac{W_{Liq}}{W_{ini}} \right]$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง (\% Solid yield)} = 100 \times \left[ \frac{W_R}{W_{ini}} \right]$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (\% Gas yield)} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว} \\ \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

โดย  $W_{ini}$  = น้ำหนักรวมของผักตบชวาเริ่มต้น

$W_R$  = น้ำหนักกากของแข็งที่ได้

$W_{Liq}$  = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติผักตบชวาแห้ง

##### 4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผักตบชวา

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบต่างๆของผักตบชวาและค่าความร้อนของผักตบชวา (ราก+ลำต้น+ใบ) ที่นำมาใช้ในการทดลองซึ่งพบว่าจะประกอบไปด้วยสารระเหยสูงร้อยละ 60.10 ความชื้นร้อยละ 0.60 คาร์บอนคงตัว 20.30 และเถ้าร้อยละ 19.00 และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่าผักตบชวาแห้งจะประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 29.70 ไฮโดรเจนร้อยละ 4.52 ไนโตรเจน 0.97 กำมะถันร้อยละ 0.21 และออกซิเจนร้อยละ 64.60

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
การวิเคราะห์แบบประมาณ	
ความชื้น (Moisture)	0.60
เถ้า (Ash)	19.00
สารระเหย (Volatiles)	60.10
คาร์บอนคงตัว (Fix carbon)	20.30
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ*	
คาร์บอน (C)	29.70
ไฮโดรเจน (H)	4.52
ไนโตรเจน (N)	0.97
กำมะถัน (S)	0.21
ออกซิเจน (O)	64.60

หมายเหตุ \*เป็นค่าที่ได้จากการส่งวิเคราะห์ as receive

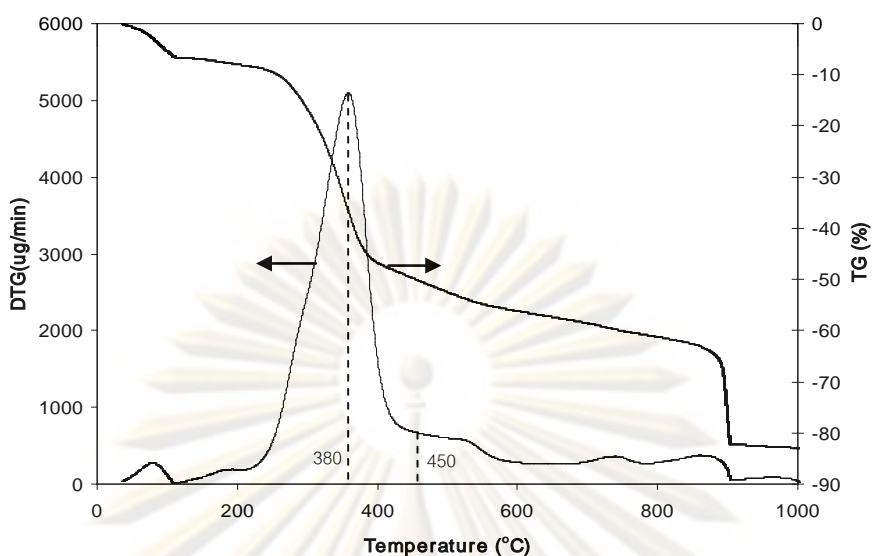
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความร้อนของของผักตบชวาเปรียบเทียบกับน้ำมันแก๊สโซลีน น้ำมันดีเซล และพืชชีวมวลต่างๆ ได้แก่ แกลบ ฟางข้าว และผักตบชวาพบว่า น้ำมันดีเซล และน้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าความร้อนที่สูงกว่าพืชชีวมวลเนื่องจากน้ำมันมีสารประกอบที่เป็น คาร์บอนและไฮโดรเจนมากกว่าชีวมวลและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างพืชชีวมวลได้แก่ ฟางข้าว แกลบ และผักตบชวาพบว่าผักตบชวามีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกันแต่แกลบมีค่าความร้อนสูงกว่า เนื่องจากแกลบมี คาร์บอนและไฮโดรเจนมากกว่า ส่วนฟางข้าวและผักตบชวามีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ไม่ต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ค  ความร  ้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	ที่มา
น้ำมันแก๊สโซลีน	47.0	กระทรวงพลังงาน, 2551
น้ำมันดีเซล	45.0	กระทรวงพลังงาน, 2550
ชีวมวล		
- ฟางข้าว	13.65	ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549
- แกลบ	14.75	ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549
- ผักตบชวา	13.10	ผลการทดลอง

#### 4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวผักตบชวาด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

เมื่อนำผักตบชวามาหาการสลายตัวของสารโดยการให้ความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกภายใต้ความดันบรรยากาศไนโตรเจนอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าผักตบชวาสลายตัวด้วยความร้อนร้อยละ 62 โดยน้ำหนักอีกร้อยละ 38 เป็นถ่านชาร์และเถ้าที่ยังไม่สลายตัวและเมื่อใช้ออกซิเจนร่วมในระบบจะพบว่ามีเถ้าอยู่ร้อยละ 19 และพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (Initial decomposition temperature,  $T_{id}$ ) เท่ากับ 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวที่อัตราการสลายตัวสูงสุด (Maximum decomposition temperature,  $T_{max}$ ) อยู่ที่ 380 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TG) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของผักตบชวาที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ความดันบรรยากาศไนโตรเจน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์หาธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในผักตบชวาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence)

นำผักตบชวาแห้งวิเคราะห์หาธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในผักตบชวา พบว่าจะประกอบไปด้วยธาตุโลหะดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์หาโลหะด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

โลหะ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (ผักตบชวา)
เหล็ก (Fe)	0.223
ซิลิคอน (Si)	0.427
โซเดียม (Na)	0.145
แมกนีเซียม (Mg)	0.213
ฟอสเฟอรัส (P)	0.144
กำมะถัน (S)	0.254
คลอไรด์ (Cl)	4.779
โพแทสเซียม (K)	5.933
แคลเซียม (Ca)	4.628

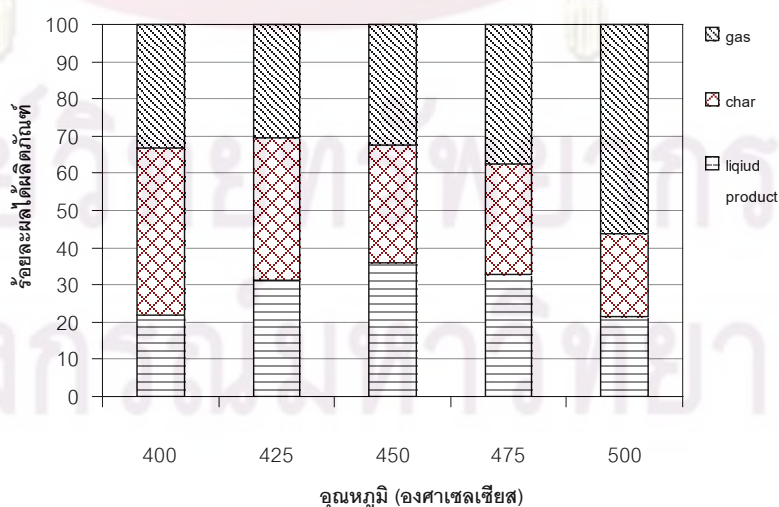
จากตารางที่ 4.3 เป็นผลการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในผักตบชวาพบว่า ในผักตบชวาจะประกอบไปด้วยธาตุโพแทสเซียมร้อยละ 5.933 คลอไรด์ร้อยละ 4.779 และแคลเซียมร้อยละ 4.628 เป็นส่วนใหญ่ ธาตุโลหะที่อยู่ในหมู่อัลคาไลน์ (Alkali) และอัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkali earth) เช่น โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียมและคลอไรด์ (Skahill, 1997) มีผลต่อการกัดกร่อนของเครื่องที่อุณหภูมิสูง

#### 4.2 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากการไพโรไลซิสผักตบชวาโดยทำการศึกษาภาวะที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ได้แก่ช่วงอุณหภูมิที่ 400, 425, 450, 475 และ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคสามช่วงขนาดได้แก่น้อยกว่า 425 ไมโครเมตร, 425-600 ไมโครเมตรและ 600 ไมโครเมตรถึง 1 มิลลิเมตร อัตราการป้อนสารที่ 1.30, 1.40, 1.66 และ 1.80 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพาที่ 0, 50, 100, 150, 200 และ 400 มิลลิเมตรต่ออนาที โดยแสดงดังต่อไปนี้

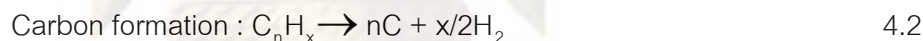
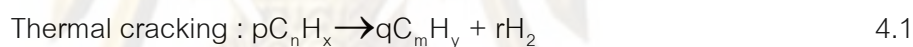
##### 4.2.1 ผลของอุณหภูมิ

ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ทำการไพโรไลซิสผักตบชวาขนาดอนุภาค 250-600 ไมโครเมตร จำนวน 200 กรัม โดยไม่ใช้แก๊สตัวพาและอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 1.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณรวมของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยศึกษาในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 425-600 ไมโครเมตร โดยไม่ใช้แก๊สตัวพาและอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 1.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความร้อนที่ให้แก่ระบบไม่เพียงพอต่อการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Depolymerization) ที่อยู่ในรูปของสารระเหยทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ปริมาณของถ่านชาร์จึงคงเหลือมาก แต่เมื่ออุณหภูมิเป็น 450 องศาเซลเซียสผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงขึ้นจากร้อยละ 22 เป็นร้อยละ 36 และผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ลดลงจากร้อยละ 45 เป็นร้อยละ 33 เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้นการแตกตัวของสารระเหย (Thermal cracking) ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้า ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยา 4.1 และ 4.2



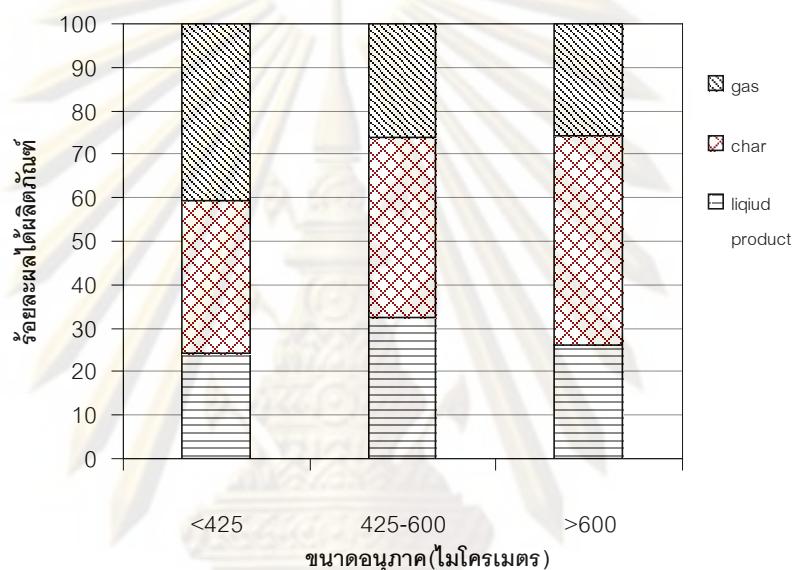
ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 450 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันและถ่านชาร์ลดลง ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking reaction), (Williams and Reed, 2003) อย่างต่อเนื่องทันทีทำให้ถ่านชาร์สลายตัวต่อไปได้แก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้อีก (Uncondensable gas), (Horne and Williams, 1996) สารระเหยเกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง

ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวสูงสุดที่ 36.12 จึงเลือกใช้ที่อุณหภูมินี้ในระบบการไพโรไลซิส



#### 4.2.2 ผลของขนาดอนุภาค

ศึกษาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยศึกษาที่ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 425 ไมโครเมตร, 425-600 ไมโครเมตร และ 600 ไมโครเมตรถึง 1 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส โดยไม่ใช้แก๊สตัวพาและอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 1.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.3 เป็นผลการศึกษาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลือสูงสุด โดยพบว่าขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 425 ไมโครเมตรได้ไบโอดีเซลร้อยละ 24.08 ถ่านชาร์ร้อยละ 35.17 และแก๊สร้อยละ 40.74 ขนาดอนุภาคในช่วง 425-600 ไมโครเมตร ได้ไบโอดีเซลร้อยละ 32.28 ถ่านชาร์ร้อยละ 41.45 และแก๊สร้อยละ 26.26 จะเห็นว่าเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นได้จากน้อยกว่า 425 ไมโครเมตรเป็น ช่วงอนุภาค 425-600 ไมโครเมตร ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลือมากขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก (Surface area) การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) ระหว่างพื้นผิวอนุภาคเกิดขึ้นได้ดี ทำให้เกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) ได้ดี ส่งผลให้ได้แก๊สในปริมาณที่สูง ขณะเดียวกันอนุภาคที่ใหญ่กว่า 600 ไมโครเมตร จะได้ร้อยละไบโอดีเซลน้อยลงถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่มีผลให้พื้นผิวน้อย การถ่ายโอน

ความร้อนระหว่างอนุภาคจึงเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้การสลายตัวไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ถ่านชาร์มากขึ้น

ขนาดอนุภาคที่ 425-600 ไมโครเมตร เป็นขนาดอนุภาคที่ให้อ้อยละผลิตภัณฑ์เหลวสูงสุดที่ 32.28 จึงเป็นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในระบบการไพโรไลซิสนี้

#### 4.2.3 ผลของอัตราการป้อนสาร

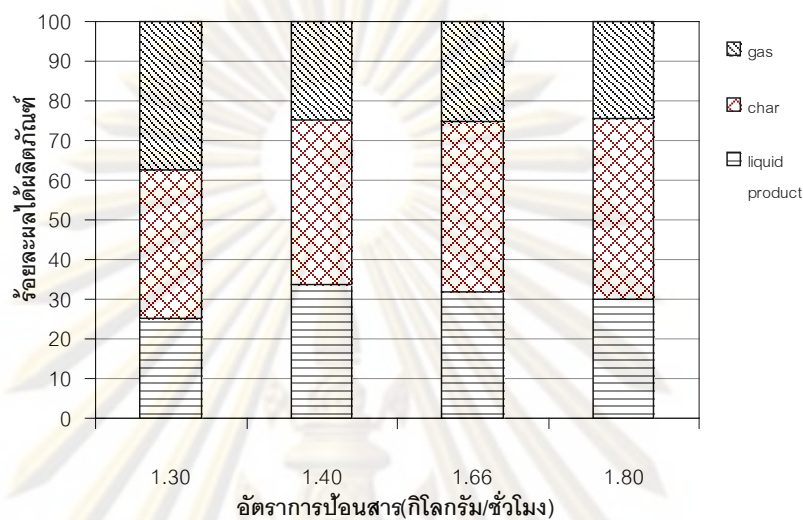
ศึกษาอัตราการป้อนสารที่เหมาะสมต่ออ้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ โดยการเปรียบเทียบปรับสกรูดังตารางที่ 4.4 ขนาดอนุภาคเหมาะสม 425-600 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเหมาะสม 450 องศาเซลเซียส โดยไม่ใช้แก๊สตัวพา ได้อ้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบปรับสกรูกับอัตราการป้อนสาร

รอบ/นาทื	กิโลกรัม/ชั่วโมง
150	1.30
175	1.40
200	1.66
225	1.80

จากตารางที่ 4.4 และรูป 4.4 ศึกษาอัตราการป้อนที่มีผลต่ออ้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ พบว่าอัตราการป้อนสารมีผลต่ออ้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ เนื่องจากในระบบการป้อนแบบสกรูพิดเดอร์ ตัวสกรูจะวิ่งผ่านเข้าไปในเตาเผา เมื่ออัตราการป้อนสารน้อย (สกรูหมุนช้า) ระยะเวลาที่สารชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Resident time) เกิดได้มากทำให้สารชีวมวลเกิดการ สลายตัวขั้นทุติยภูมิได้ดี ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ขณะเดียวกัน อัตราการป้อนสารที่สูง (สกรูหมุนเร็ว) ระยะเวลาที่สารชีวมวลสัมผัสความรอนเกิดได้น้อย ทำให้เกิดการสลายตัวของสารที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้นแต่เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการป้อนสารที่ 1.40, 1.66 และ 1.80 กิโลกรัม/ชั่วโมง พบว่าอัตราการป้อนสารมีผลต่ออ้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แตกต่างกัน

อัตราการป้อนสาร 1.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง เป็นอัตราที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวสูงสุด จึงเลือกใช้การป้อนสารที่อัตรานี้

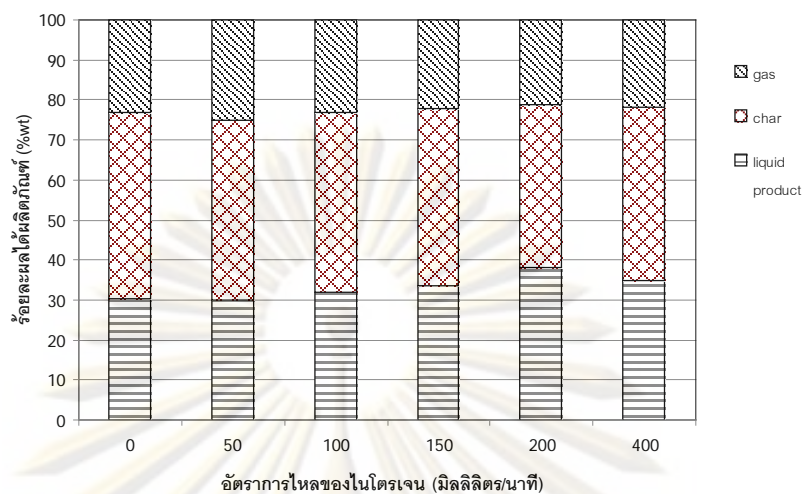


รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการป้อนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

#### 4.2.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

ศึกษาอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 425-600 ไมโครเมตรและอัตราการป้อนสารที่ 1.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 พบว่าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาไนโตรเจน มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ อัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่สูงจะขจัดสารระเหยที่อยู่ในรูปของแก๊สที่ควบแน่นได้ (Condense gases) ต่างๆออกจากระบบได้เร็วทำให้สารระเหยสลายตัวยังไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวลดน้อยลง ขณะเดียวกันที่อัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่ำ จะขจัดสารระเหยแก๊สออกจากระบบได้ช้าทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิได้อีกทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

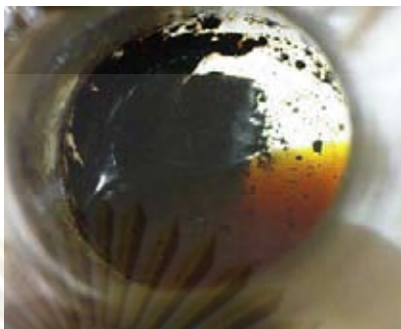
#### 4.3 ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก

ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเหมาะสม 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 425-600 ไมโครเมตร อัตราการป้อนสารที่ 1.40 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 200 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก

ครั้งที่	ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์	
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก
1	21.52	15.57
2	22.91	15.16
3	24.67	15.24
4	22.82	15.05
เฉลี่ย	22.98	15.25

จากตารางที่ 4.5 พบว่าน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสที่แบ่งได้ 2 ส่วนหลักคือ น้ำมันเบาและน้ำมันหนักและเกิดการแยกเฟสระหว่างน้ำมันทั้งสองโดยน้ำมันเบา (เฟสบน) แสดงดังรูปที่ 4.6 ได้ร้อยละ 22.98 และน้ำมันหนัก (เฟสล่าง) ได้ร้อยละ 15.25 หรืออัตราส่วนน้ำมันหนักต่อน้ำมันเบา 1 ต่อ 1.5



(ก) การแยกเฟสของน้ำมันหนักและน้ำมันเบา



(ก) น้ำมันเบา



(ค) น้ำมันหนัก

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิส

#### 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของไบโอดีเซล

##### 4.4.1 ค่าความร้อนของน้ำมันหนักและน้ำมันเบา

ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ทั้งสองส่วนมาวิเคราะห์ค่าความร้อนพบว่าส่วนของน้ำมันหนักหาค่าความร้อนได้ ส่วนที่เรียกว่าน้ำมันเบาไม่สามารถหาค่าความร้อนได้เนื่องจากมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมาก จึงต้องผ่านการกลั่นแยกน้ำออกที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความร้อนของน้ำมันหนักอยู่ในช่วงประมาณ 31.12 เมกกะจูล/กิโลกรัม ส่วนน้ำมันเบาที่ผ่านการกลั่นแยกแล้วมีค่าความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 41.5 เมกกะจูล/กิโลกรัม แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันหนักมีค่าน้อยกว่าน้ำมันเบาเนื่องจากมีคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ต่ำกว่าน้ำมันเบาแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความร้อนน้ำมันหนักและน้ำมันเบาที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	
	น้ำมันหนัก	น้ำมันเบา
400	33.53±5.24	41.20±1.54
425	32.41±5.10	39.13±1.71
450	31.00±4.93	40.90±2.63
475	30.20±6.45	39.30±1.95
500	28.5±10.96	39.80±1.84

#### 4.4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของน้ำมัน

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันหนักและน้ำมันเบา

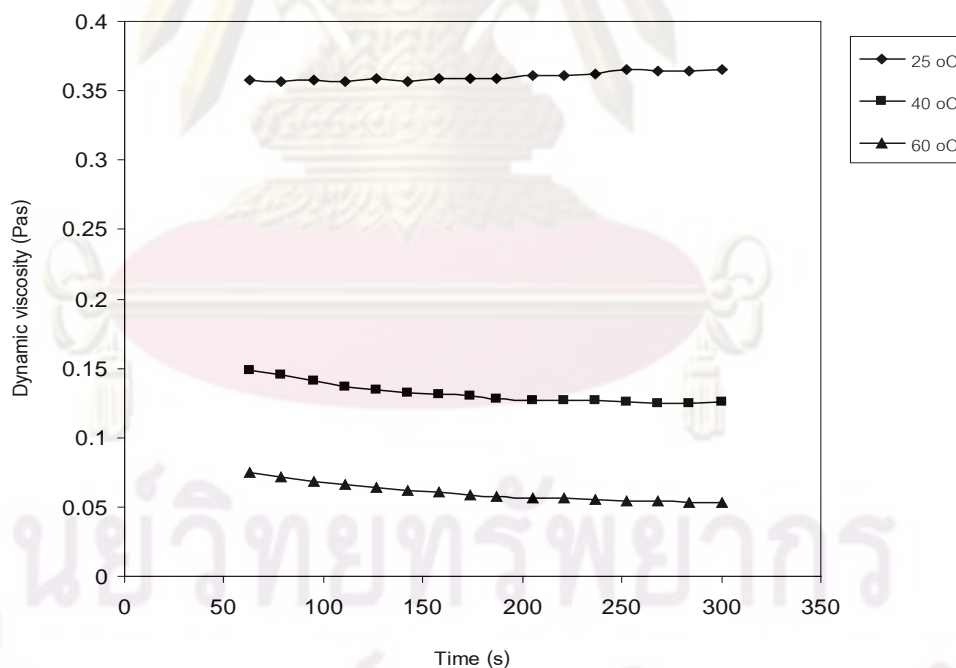
คุณสมบัติ	ชนิดของน้ำมัน			วิธีการทดลอง
	Heavy oil	Light oil	Narabia*	
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	31.0±0.10	41.5±0.16**	44.5±0.03	ASTM D3177
ความหนาแน่น 15 องศาเซลเซียส (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	n/a	1.06±0.07	0.88±0.01	ASTM D1298
ค่าความหนืด ไดนามิกส์ (ปาสคาล) 25 องศาเซลเซียส	0.354	}n/a	}n/a	เครื่อง Rheometer
40 องศาเซลเซียส	0.127			
60 องศาเซลเซียส	0.057			
คาร์บอนที่เหลือ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	4.53	9.16	-	ASTM D524-04
ซีเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	11.69±0.01	3.68±0.00	0.04±0.00	ASTM D 482-03
ค่าความเป็นกรดต่าง	3-4	4.8	5.2	pH meter
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	n/a	76**	35	ASTM D93

\* หมายเหตุ Heavy oil และ Light oil ได้จากไพโรไลซิสจากผักตบชวาและ Narabia เป็น  
น้ำมันดิบจากบริษัท ปตท จำกัด (มหาชน)

\*\* ค่าความร้อนและจุดวาบไฟเป็นค่าที่หาได้เมื่อ light oil ผ่านการกลั่นแล้ว

จากตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของน้ำมันหนักและน้ำมันเบาเมื่อเปรียบเทียบกับพบว่าค่าความหนาแน่น (Density) ของน้ำมันหนักไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากที่ 15 องศาเซลเซียส จน้ำมันหนักที่ได้มีความหนืดที่สูงมากทำให้จับตัวเป็นก้อนวัดปริมาตรได้ยากส่วนน้ำมันเบาค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 1.06 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ค่าความหนืด (Viscosity) นำน้ำมันหนักและน้ำมันเบาวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.354 ปาสคาล/วินาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.127 ปาสคาล/วินาที และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.057 ปาสคาล/วินาที แสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นความหนืดที่ได้ลดลงเนื่องจาก ความร้อนมีผลทำให้โครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัว (Das, 2004) ส่วนน้ำมันเบาที่อุณหภูมิทั้งสามมีค่าความหนืดน้อยมากจนเครื่อง Rheometer ไม่สามารถอ่านค่าได้ เช่นเดียวกับน้ำมันดิบ Narabia



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันหนักที่อุณหภูมิต่างๆ

จากตารางที่ 4.7 ในน้ำมันหนักมีกากคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ร้อยละ 4.53 ชี้อัดร้อยละ 11.69 น้ำมันเบา มีกากคาร์บอนร้อยละ 9.16 มีชี้อัดร้อยละ 3.68 ทั้งนี้เห็นว่าปริมาณกาก

คาร์บอนที่หลงเหลือหลังจากการเผาไหม้และซีไธ้ายังอยู่ในปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่กระทรวงพาณิชย์กำหนดค่าคาร์บอนไว้ที่ร้อยละ 0.05 และซีไธ้าร้อยละ 0.01

(www.etoynaclub.net)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมันหนักอยู่ที่ 3-4 และน้ำมันเบาที่ 4.8 จะเห็นว่าน้ำมันทั้งสองอยู่ในสถานะที่เป็นกรดอ่อน และมีความเข้มข้นกว่าในส่วนของน้ำมันดิบ Narabia ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมันหนักและน้ำมันเบาจะประกอบไปด้วยสารประกอบที่เป็นกรดมากกว่าร้อยละ 7-12 ฟีนอล เมทานอล แอลกอฮอล์ ฮัลดีไธด์ คีโธน (Lu และคณะ, 2008)

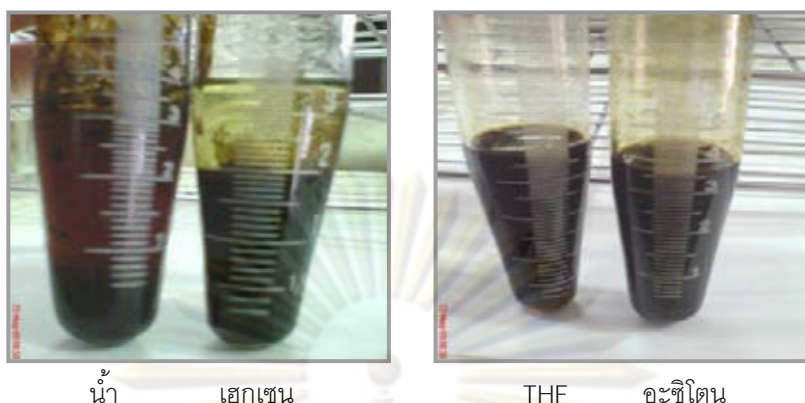
จุดวาบไฟ (Flash point) โดยทั่วไปจุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลอยู่ที่ 40-70 องศาเซลเซียส (Lu Quiang, 2005) แต่ในกรณีนี้ไม่สามารถหาจุดวาบไฟของน้ำมันหนักได้ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันหนักได้ เมื่อนำไปหาจุดวาบไฟเกิดการระเหย ความดันไอของน้ำจะยับยั้งไอสารระเหยในน้ำมันทำให้ไม่สามารถหาค่าได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 70-100 องศาเซลเซียส (Oasmaa, 1997)

สภาพขั้วของน้ำมัน (Polarity) นำน้ำมันที่ได้มาทดสอบการละลายในน้ำ เฮกเซน เตตระไฮโดรฟลูออเรน และอะซีโธน จากการศึกษาผลของการละลายและสภาพความมีขั้วของน้ำมันหนักที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส พบว่า น้ำมันหนักที่ได้นั้นละลายได้ดีในเตตระไฮโดรฟลูออเรนและอะซีโธนซึ่งเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วปานกลาง แสดงดังรูปที่ 4.8 และตาราง 4.8 เมื่อผสมกับน้ำจะละลายได้น้อยมาก และจะไม่ละลายในเฮกเซนซึ่งไม่มีขั้วซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันที่ได้นั้นมีความมีขั้วปานกลาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





น้ำ เฮกเซน THF อะซิโตน

รูปที่ 4.8 แสดงสภาพค่าการละลายของน้ำมัน

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความมีขี้ขงสารต่างๆ

Solvent	Polarity Index	Refractive Index @20°C	UV(nm) Cutoff @1AU	Boiling Point(°C)	Viscosity (cPoise)	Solubility in water (%w/w)
Acetic Acid	6.2	1.372	230	118	1.26	100
Acetone	5.1	1.359	330	56	0.32	100
Acetonitrile	5.8	1.344	190	82	0.37	100
Benzene	2.7	1.501	280	80	0.65	0.18
n-Butanol	4.0	1.394	254	125	0.73	0.43
Butyl Acetate	3.9	1.399	215	118	2.98	7.81
Carbon Tetrachloride	1.6	1.466	263	77	0.97	0.08
Chloroform	4.1	1.446	245	61	0.57	0.815
Cyclohexane	0.2	1.426	200	81	1.00	0.01
1,2-Dichloroethane <sup>1</sup>	3.5	1.444	225	84	0.79	0.81
Dichloromethane <sup>2</sup>	3.1	1.424	235	41	0.44	1.6
Dimethylformamide	6.4	1.431	268	155	0.92	100
Dimethyl Sulfoxide <sup>3</sup>	7.2	1.478	268	189	2.00	100
Dioxane	4.8	1.422	215	101	1.54	100
Ethanol	5.2	1.360	210	78	1.20	100
Ethyl Acetate	4.4	1.372	260	77	0.45	8.7
Di-Ethyl Ether	2.8	1.353	220	35	0.32	6.89
Heptane	0.0	1.387	200	98	0.39	0.0003
Hexane	0.0	1.375	200	69	0.33	0.001
Methanol	5.1	1.329	205	65	0.60	100
Methyl-t-Butyl Ether <sup>4</sup>	2.5	1.369	210	55	0.27	4.8
Methyl Ethyl Ketone <sup>5</sup>	4.7	1.379	329	80	0.45	24
Pentane	0.0	1.358	200	36	0.23	0.004
n-Propanol	4.0	1.384	210	97	2.27	100
Iso-Propanol <sup>6</sup>	3.9	1.377	210	82	2.30	100
Di-Iso-Propyl Ether	2.2	1.368	220	68	0.37	
Tetrahydrofuran	4.0	1.407	215	65	0.55	100
Toluene	2.4	1.496	285	111	0.59	0.051
Tichloroethylene	1.0	1.477	273	87	0.57	0.11
Water	9.0	1.333	200	100	1.00	100
Xylene	2.5	1.500	290	139	0.61	0.018

Ref : Handbook of organic chemistry

การกัดกร่อน (Corrosion) น้ำมันหนักและน้ำมันเบาจากไพโรไลซิสของผักตบชวา  
ทดลองการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM D130/IP 154 โดยใช้ทองแดงจุ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมงแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าตัวอย่างน้ำมันเบาที่มีแผ่นทองแดงที่ตรงกับแผ่น

เทียบมาตรฐาน 1a และน้ำมันหนักมีแผ่นทองแดงตรงกับแผ่นเทียบมาตรฐาน 1b ซึ่งทั้งสองขึ้นตรงกับค่า Slight tarnish ซึ่งมีค่าการกัดกร่อนเล็กน้อย



รูปที่ 4.9 การกัดกร่อนของน้ำมันผสม ตามมาตรฐาน ASTM D130/IP 154

#### 4.5 การทดสอบองค์ประกอบทางด้านเคมี

##### 4.5.1 ปริมาณกำมะถันในไบโอดีเซล (น้ำมันหนัก+น้ำมันเบา) และถ่านชาร์ที่ อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.9 ปริมาณกำมะถันในไบโอดีเซลและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละกำมะถัน	
	ไบโอดีเซล	ถ่านชาร์
400	0.26±0.06	0.38±0.04
425	0.32±0.02	0.36±0.11
450	0.45±0.03	0.32±0.10
475	0.40±0.05	0.35±0.04
500	0.31±0.02	0.32±0.03

จากตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณร้อยละกำมะถันในไบโอดีเซลและถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยการไทเทรตกับสารละลายแบเรียมคลอไรด์ มีค่ากำมะถันในไบโอดีเซล และในถ่านชาร์ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำไปหาค่ากำมะถันโดยใช้เครื่อง CHNS Analyzer พบว่าในน้ำมันหนักมีกำมะถันร้อยละ 0.304 น้ำมันเบาร้อยละ 0.207 และถ่านชาร์ร้อยละ 0.158 พบอัตราส่วนของไฮโดรเจนและคาร์บอนในน้ำมันเบาสูงกว่าในน้ำมันหนักทำให้ค่าความร้อนที่ได้แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.10

##### 4.5.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุด้วยเครื่อง CHNS Analyzer

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก		
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก	ถ่านชาร์
คาร์บอน	78.299	55.031	12.049
ไฮโดรเจน	8.587	8.333	1.170
ไนโตรเจน	0.328	0.057	0.941
กำมะถัน	0.207	0.304	0.158
ออกซิเจน	12.579	36.275	47.852

### 4.5.3 ปริมาณโลหะในถ่านชาร์

จากตารางที่ 4.11 พบว่า ถ่านชาร์จะประกอบไปด้วยโพแทสเซียมร้อยละ 14.90 ซิลิคอนร้อยละ 7.416 คลอไรด์ร้อยละ 13.220 แคลเซียมร้อยละ 6.545 นอกจากนี้ยังมีฟอสฟอรัสอยู่ในปริมาณหนึ่งด้วยปริมาณโพแทสเซียมและคลอไรด์ที่สูงเนื่องจากเป็นพีชน้ำที่โตเร็วและปริมาณธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบในถ่านชาร์สามารถนำไปใช้ปรับปรุงดินและเป็นสารอาหารให้พืชเจริญเติบโตเร็ว (Sander, 2008)

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์โลหะในถ่านชาร์

โลหะ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (ถ่านชาร์)
เหล็ก (Fe)	3.009
ซิลิคอน (Si)	7.416
โซเดียม (Na)	1.010
แมกนีเซียม (Mg)	1.440
ฟอสฟอรัส (P)	3.253
กำมะถัน (S)	0.544
คลอไรด์ (Cl)	13.220
โพแทสเซียม (K)	14.900
แคลเซียม (Ca)	6.545

### 4.5.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ 4.12 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊ส โดยพบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 คาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าร้อยละ 14 เป็นองค์ประกอบหลัก มีแก๊สไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 5 และแก๊สมีเทนปริมาณเล็กน้อย ซึ่งปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตาราง 4.12 องค์ประกอบแก๊สที่อุณหภูมิต่างๆ

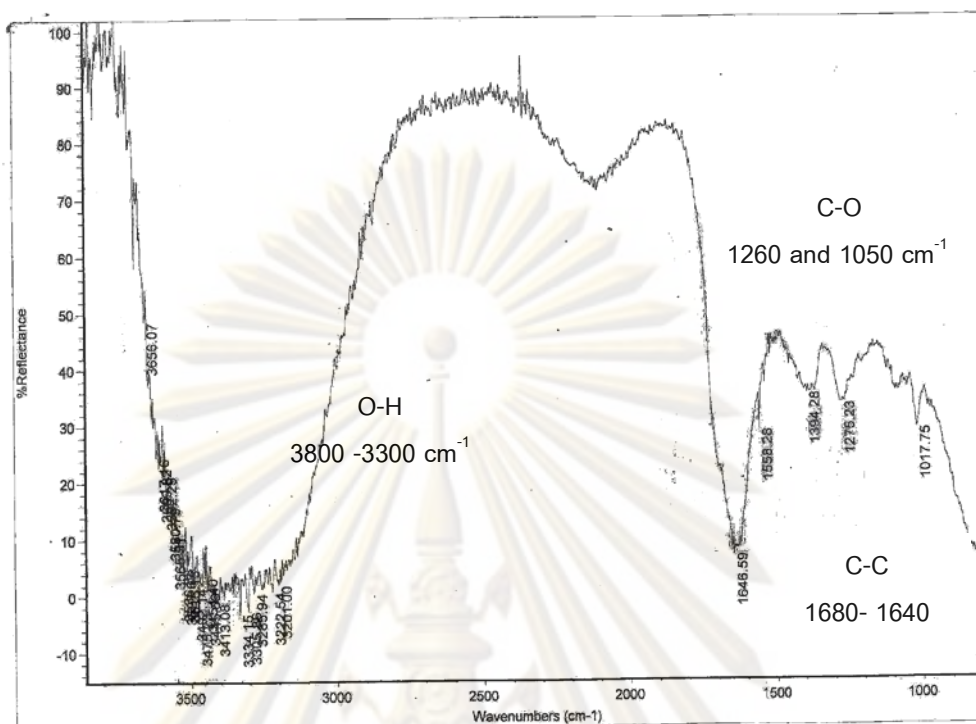
องค์ประกอบแก๊ส % โดยปริมาตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	400	425	450	475	500
H <sub>2</sub>	1.08	5.07	5.13	5.27	5.64
CH <sub>4</sub>	0.52	0.96	1.05	1.13	1.75
CO	14.34	15.36	15.53	15.68	15.92
CO <sub>2</sub>	84.06	78.61	78.29	77.92	76.69

#### 4.5.5 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

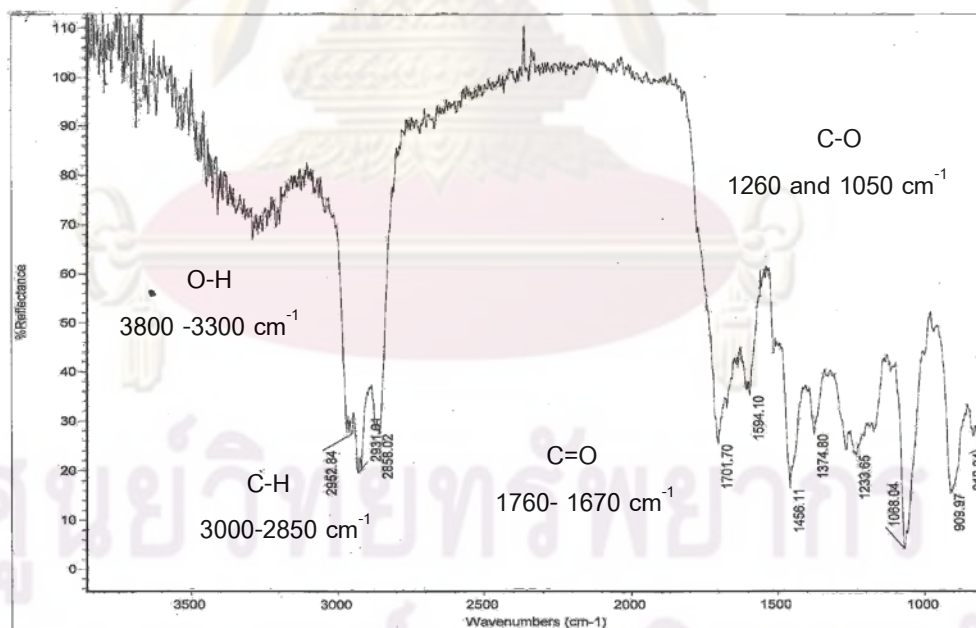
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักที่ได้จากการไพโรไลซิสผักตบชวาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 10 นาที โดยพบเลขคลื่นสำคัญในน้ำมันเบาดังรูปที่ 4.11 หมู่ฟังก์ชัน -OH ที่เลขคลื่น 3800-3300  $\text{cm}^{-1}$  C=C ที่เลขคลื่น 1680-1640  $\text{cm}^{-1}$  และ C-O ที่เลขคลื่น 1260 และ 1050  $\text{cm}^{-1}$  และน้ำมันหนักพบเลขคลื่นสำคัญได้แก่ -OH ที่เลขคลื่น 3800-3300  $\text{cm}^{-1}$  C-H ที่เลขคลื่น 3000-2850  $\text{cm}^{-1}$  C=O ที่เลขคลื่น 1760-1670  $\text{cm}^{-1}$  และ C-O ที่เลขคลื่น 1260 และ 1050  $\text{cm}^{-1}$  แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันหนักและน้ำมันเบาจากไพโรไลซิสผักตบชวา

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	ชนิดของสารประกอบ
O-H	3800-3300	H <sub>2</sub> O, Phenol, Alcohol
C-H	3000-2850	Alkane
C=O	1760-1670	Ketone, Quinones, Aldehyde
C-O	1260 and 1050	Ether, Carboxylic acid
C=C	1680-1640	Aromatic



(ก)



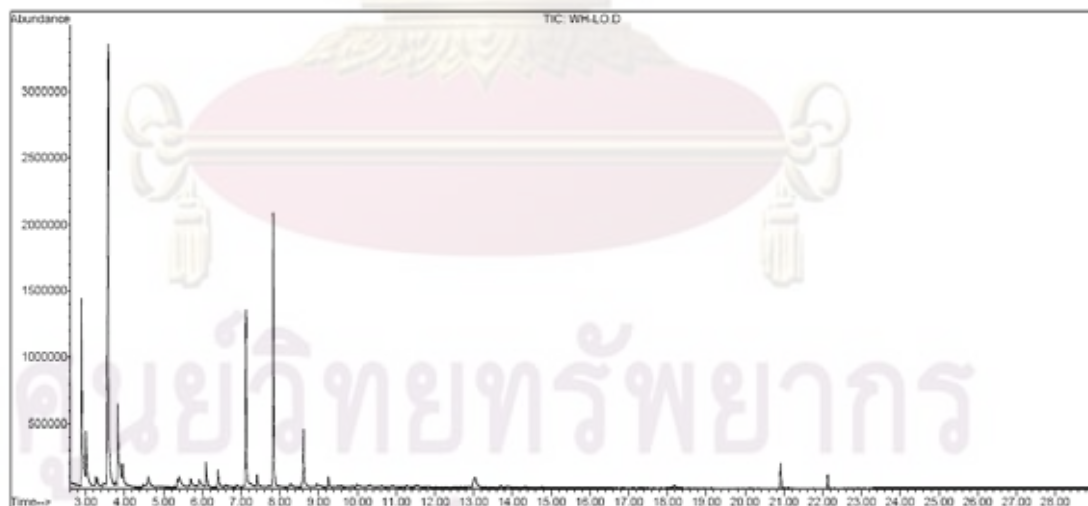
(ข)

รูปที่ 4.11 องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของโพลีไคซีส (ก) น้ำมันเบา (ข) น้ำมันหนัก จากโพลีไคซีส  
ผักตบชวา

#### 4.5.6 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)

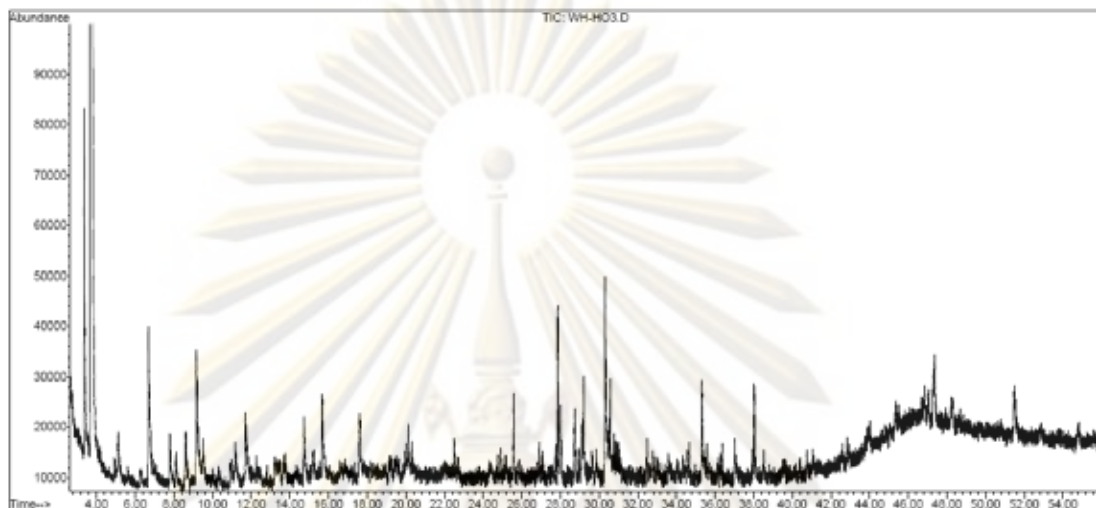
การวิเคราะห์ส่วนประกอบของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักจากผักตบชวา ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปี (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy) ในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 พบองค์ประกอบองค์ประกอบหลักในน้ำมันเบา ได้แก่ 1,3-Cyclopentanedione, 2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl- และสาร 4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl- เป็นต้น และองค์ประกอบหลักในน้ำมันหนัก ได้แก่ 2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl 2-Pentanone, 4-hydroxy- และ Phenol เป็นต้น โดยสารที่พบในน้ำมันเบาจะเป็นสารประกอบคีโตนและแอลกอฮอล์ เป็นส่วนใหญ่ ในส่วนของน้ำมันหนักพบสารประกอบคีโตนในปริมาณที่สูงกว่าในน้ำมันเบา นอกจากนี้ยังพบสารประกอบฟีนอลด้วย แสดงดังตารางที่ 4.14 และ 4.15

```
File       : D:\CIF2009\KAI\CIFS118\WH-LO.D
Operator   : SIRICHAJ K.
Acquired   : 14 Sep 2009 19:27      using AcqMethod CIFS118
Instrument : Instrumen
Sample Name: WH-LIGHT OIL
Misc Info  : WH-LIGH OIL/ ACETONE 3 uL SP 1/2 RAMP10C/MIN
Vial Number: 6
```



รูปที่ 4.12 โครมาโตแกรมน้ำมันเบาของผักตบชวาจากแก๊สโครมาโตกราฟีชนิดแมสสเปกโตรสโกปี

File : D:\CIF2009\KAI\CIFSA118\WH-HO3.D  
 Operator : SIRICHAJ K.  
 Acquired : 14 Sep 2009 16:18 using AcqMethod CIFSA118  
 Instrument : Instrumen  
 Sample Name: WH-HO3  
 Misc Info : WH-HO3 IN ACETONE 3 uL SP 1/2 RAMP 5C/MIN  
 Vial Number: 4



รูปที่ 4.13 โครมาโตแกรมน้ำมันหนักของผักตบชวาจากแก๊สโครมาโตกราฟีชนิดแมสสเปกโทรสโกปี

ตารางที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเบาจากไพโรไลซิสผักตบชวาโดย GC-MS

เวลา R.T. (S)	องค์ประกอบ	ร้อยละพื้นที่
		น้ำมันเบา
2.706	1-propen-2-ol	0.06
2.882	1,3-Cyclopentanedione	9.44
3.006	1H-Pyrazole, 4,5-dihydro-1,5-dimethyl-	3.93
3.577	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	29.64
5.404	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	1.64
5.704	Phenol	0.90
5.916	Piperidine, 3-methyl-	0.78
6.405	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	0.25
7.834	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	13.59
8.614	.beta.-(N-tert-Butylformamido) acrolein	3.68
9.256	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	0.64
13.037	d-Allose	1.77



ตารางที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเบาจากไฟโรไลซิสผักตบชวาโดย GC-MS (ต่อ)

เวลา R.T. (S)	องค์ประกอบ	ร้อยละพื้นที่
		น้ำมันเบา
18.188	Hexadecanoic acid	0.17
20.912	Benzene, 1,1'-sulfonylbis[4-chloro-	1.44
22.132	Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	0.75
23.336	Benzene, 1-butyl-4-	0.06

ตารางที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันหนักจากไฟโรไลซิสผักตบชวาโดย GC-MS

เวลา R.T. (S)	องค์ประกอบ	ร้อยละพื้นที่
		น้ำมันหนัก
3.358	2-Pentanone, 4-hydroxy-	1.94
3.730	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl	86.76
6.686	Phenol	1.67
9.158	Phenol, 4-methyl-	1.75
11.770	Phenol, 3-ethyl-	0.08
15.680	3-Methyl-2-(2-methyl-2-butenyl)	0.64
25.584	1-Decene, 9-methyl-	0.54
27.864	Neophytadiene	0.98
28.001	2-Hexadecene, 3,7,11,15-tetrame	0.59
28.738	Trimethylhexahydroindanone	0.69
29.205	2-Octylfuran	0.68
30.314	Hexadecanoic acid	1.68
30.575	Phenylpropanolamine acetate	0.55
35.318	Benzene, 1,1'-sulfonylbis[4-chloro-	0.73
38.032	Hexanedioic acid, dioctyl ester	0.74

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยการไพโรไลซิสผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

##### 5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติผักตบชวา

ผักตบชวาประกอบไปด้วย สารระเหยสูงร้อยละ 60.10 ความชื้นร้อยละ 0.60 คาร์บอนคงตัว 20.30 และเถ้าร้อยละ 19.00 และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่าผักตบชวาแห้งจะประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 23.59 ไฮโดรเจนร้อยละ 4.62 ไนโตรเจน 0.58 กำมะถันร้อยละ 0.10 และออกซิเจนร้อยละ 52.11 และมีค่าความร้อน 13.10 เมกกะจูล/กิโลกรัม

##### 5.1.2 การสลายตัวของผักตบชวา

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer พบว่า ผักตบชวามีค่าการสลายตัวสูงสุดที่ 380 องศาเซลเซียส และสลายตัวค่อนข้างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

##### 5.1.3 ธาตุโลหะในผักตบชวาและถ่านชาร์

จากการวิเคราะห์พบธาตุโลหะในผักตบชวาและถ่านชาร์ที่สำคัญได้แก่ แมกนีเซียม โซเดียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและคลอไรด์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นธาตุในหมู่ หมู่อัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ธ

##### 5.1.4 สภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิส

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิส คือที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคในช่วง 425-600 ไมโครเมตร อัตราการป้อนสาร 1.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง

และอัตราการไหลของแก๊สดั่วที่ 200 มิลลิลิตร/นาที ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว ที่ 38.23

#### 5.1.5 อัตราส่วนน้ำมันเบาต่อน้ำมันหนัก

จากผลการไพโรไลซิสได้อัตราส่วนน้ำมันเบาอยู่ที่ร้อยละ 22.98 และน้ำมันหนักร้อยละ 15.15 หรืออัตราส่วน 1.5 ต่อ 1 น้ำมันแยกขึ้นเป็นสองเฟส น้ำมันเบาเฟสบนและน้ำมันหนักเฟสล่าง

#### 5.1.6 คุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานต่างๆของน้ำมัน

ค่าความร้อนน้ำมันเบาที่ผ่านการกลั่น 41.05 เมกกะจูล/กิโลกรัม pH 4.8 น้ำมันหนัก 31.0 เมกกะจูล/กิโลกรัม ค่า pH 3-4 โดยน้ำมันเบาที่ผ่านการกลั่นแยกมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่าน้ำมันหนัก โดยน้ำมันทั้งสองมีสภาพการกัดกร่อนแผ่นทองแดงเล็กน้อยและละลายได้ดีในอะซิโตนและเตระไฮโดรฟลูออเรน

#### 5.1.7 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

น้ำมันหนักและน้ำมันเบาประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน O-H ได้แก่ น้ำ ฟีนอล แอลกอฮอล์ หมู่ C-H ได้แก่ สารประกอบอัลเคน หมู่ C=O ได้แก่ คีโตน ควิโนน อัลดีไฮด์ หมู่ C-O ได้แก่ อีเทอร์ กรดคาร์บอกซิลิก และหมู่ C=C ได้แก่ สารประกอบอโรมาติก

#### 5.1.8 วิเคราะห์ส่วนประกอบของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักจากผักตบชวาโดยใช้เทคนิคแก๊ส

โครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปี (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy)

พบองค์ประกอบหลักในน้ำมันเบา ได้แก่ 1,3-Cyclopentanedione 2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl- และ 4-Piperidinone, 2, 2, 6, 6-Tetramethyl- เป็นต้น องค์ประกอบหลักในน้ำมันหนัก ได้แก่ 2-Pentanone, 4-hydroxymethyl 2-Pentanone, 4-hydroxy- และ Phenol เป็นต้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ระบบการไฟฟระไลซิสแบบต่อเนื่องในส่วนองตัวแยกสารจะมีน้ำมันเกาะติดอยู่เป็นจำนวนมากหากแก้ไขได้โดยการให้ความร้อนบริเวณตัวเก็บสารมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิเตาก็สามารถสามารถเก็บน้ำมันในส่วนนี้ได้และจะได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวที่เพิ่มขึ้นได้

5.2.2 น้ำมันหนักที่ได้จากการไฟฟระไลซิสสามารถนำไปใช้กลั่นแยกเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงอื่นได้ แต่ต้องมีกรขจัดน้ำออกและขจัดส่วนที่เป็นเถ้าเบาที่ตกค้างอยู่ในน้ำมันออกก่อน หรือนำไปผสมร่วมกับน้ำมันเตาเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

5.2.3 ถ่านซาร์ที่ได้จากการไฟฟระไลซิสสามารถนำไปปรับสภาพเพื่อใช้เป็นตัวรองรับ หรือดูดซับแก๊สพิษอีกทั้งยังนำไปใช้ปรับสภาพดินให้มีแร่ธาตุอาหารมากขึ้น หรือนำไปอัดแท่งขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็งได้

5.2.4 ผลิตแก๊สที่ได้จากการไฟฟระไลซิสสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกทั้งยังก่อผลต่อมลภาวะที่น้อยเนื่องจากมีแก๊ส ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) และซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ฉัตรชัย ธนศรีสุข การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ วิทยานิพนธ์  
ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2541
- ชีวมวล, ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2549
- ชูศักดิ์ โทกะนุทรานนท์. การคาร์บอนไนซ์แกลบนในฟลูอิดไคซ์เบด: วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต.  
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- นันทนา อิทธิพรโกวิท การกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิลและค  
รอสส์ลิง-แซนเทตที่ทำจากผักตบชวา วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชา  
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- ระวีวรรณ แก้วกล้า การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชา  
เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532
- รายงานสถานการณ์การนำเข้า-ส่งออก น้ำมันเชื้อเพลิง 2552 กระทรวงพลังงาน, 2552
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. ผักตบชวา [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://th.wikipedia.org> [2552, กุมภาพันธ์ 24]
- วรรณรัตน์ ชาญนุกูล .นโยบายพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552
- สมศักดิ์ ดำรงเลิศ. ฟลูอิดไคซ์ชัน สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- สินินาฏ รอดจิ้น ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน  
วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2547
- อุสาร์ห์ บุญบำรุง. พลังงานชีวมวล : แหล่งพลังงาน, สำนักงานงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2546
- เอกสารเผยแพร่, เหม้ามันสำปะหลัง ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณ  
วาจกกลกิจฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550

### ภาษาอังกฤษ

Available from : <http://www.etoyotaclub.net>

Available from : [http://www.nzetc.org/etexts/Bio19Tuat01/Bio19Tuat01\\_044a.jpg](http://www.nzetc.org/etexts/Bio19Tuat01/Bio19Tuat01_044a.jpg)

Available from : [http://www.research.uky.edu/green\\_energy.html](http://www.research.uky.edu/green_energy.html)

Available from : <http://www.tionbiotech.com/lentin1.htm>

- Amanda, D., Kang, L. C. **Pyrolysis of switchgrass to fuels.**
- Anthony, V. B. Biomass fast pyrolysis. **Thermal Science** 8 (2004): 21-49
- Antal, Jr. M.J. Biomass Pyrolysis: A Review of Literature Part 1-Carbohydrate Pyrolysis. Part 2-Lignocellulose Pyrolysis. **Advance in Solar Energy**. New York. American Solar Energy Society: 1982
- Asadullah M, Rahman M.A, Ali M.M, Rahman M.S, Motin M.A., Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. **fuel** 86 (2007) : 2514-2520
- Babu, B. V. Biomass pyrolysis: a state-of-the-art review. **Biofuels Bioproduct & Biorefining** 2 (2008): 393-414.
- Blogs.princeton.edu/.../01\_chemistry/
- Boateng A.A., Jung H.G. and Adler P.R. Pyrolysis of energy crops including alfalfa stems, reed canarygrass. **Fuel** 85 (2006) : 2450–2457.
- Bridgewater, A.V., and Bridge, S. A. (1991). In. Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization., (A. V. Bridgewater nad G. Grassi, eds.), p. 11 Elsevier Applied Science, New York.
- Charles A., Mullen and Akwasi A. Chemical composition of bio-oil produced by fast pyrolysis of two energy crop. **Energy & Fuels**, (2008) 22 : 2104-2109.
- Czernik, S and Bridgewater, A. V. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. **Energy & Fuels** 18 (2004): 590-598.
- Czernik, S., Scahill, J., Diebold, J., The Production of Liquid Fuel by Fast Pyrolysis of Biomass, **Journal of Solar Energy Engineering** 117 (1995): 2-6
- Das Piyali, Sreelatha T, Ganesh Anuradda. Bio oil from pyrolysis of cashew nut shell-characterisation and related properties, **Biomass Bioenergy** 27 (2004): 265–75.
- Donald L. Klass ., Biomass for Renewable Energy Fuel and Chemical, Academy Press Limited 1998
- Diebold, J., Scahill, J., Production of primary pyrolysis oils in a vortex reactor, in: pyrolysis oils from biomass: **Producing, Analyzing, and Upgrading** (Eds. E. J. Soltes, T. A. Milne), ACS, Washington, D. C., ACS Symposium Series 376 (1988): 31-40.
- Dinesh, M., Charles, U. P., Jr., Philip, H. S. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy & Fuels** 20 (2006): 848-889.

- Graham, R. G., Freel, B. A., Bergougnou, M. A., The production of pyrolysis liquids, gas, and char from wood and cellulose by fast pyrolysis, in: **research in thermochemical biomass conversion** (Eds. A. V. Bridgwater, J. L. Kuester), Elsevier, London (1988): 629-641.
- Hingman C and Van der burgh M. **Gasification**, Second Edition. 2003.
- Horne, P.A., Williams, P.T., Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. **Fuel** 75 (1996): 1051–1059.
- Ji-lu Z, Wei-ming Y, Na-na W, “Bio-oil production from cotton stalk” **Energy conversion and management** 49 (2008): 1742-1730
- J.W. Scahill, J.P. Diebold, C.J. Feik, Developments in Thermochemical Biomass Conversion, **Blackie**, London (1997): 253–266.
- Lee, K-H., Kang, B-S., Park, Y-K and Kim, J-S., Influence of reaction temperature, pre-treatment, and a char removal system on the production of bio-oil from rice strew by fast pyrolysis, using a fluidized bed. **Energy & Fuels** 19 (2005): 2179-2184.
- Lu, Qiang., Yang, X-L, Zhu, X-F. Analysis on chemical and properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. **Journal Analytical and Applied Pyrolysis** 82 (2008): 191-198.
- Lu Qiang, Li Wen-Zhi, Zhu Xi-Feng. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. **Energy Conversion and Management** 50 (2009): 1376–1383
- Maniatis., K. and A., Buekens. Fast pyrolysis of biomass A.V. Bridgewater and J.L.Kuester. Recsearch in thermochemical biomass conversion. **Great Britain Science** (1998): 179-189.
- Manuel, G. P., Xiao, S. W., Jun, S., Martin, J. R., Fujun, T., Woo-Jin, L., Hongwei, W and Chun-Zhu, L. Fast pyrolysis of oil malee woody biomass: Effect of temperature on the yield and quality of pyrolysis products. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 47 (2008): 1846-1854.
- Mohan D., Pittman C., and Steele P.H. pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. **Energy & Fuels**, 20 (2006): 848-889.
- Nikitin, N. I. et al. (1962). The chemistry of cellulose and wood., (translated in 1996 from Russian by J. Schmorak, Israel Program for Sciencetific Translations, Jerusalem, Israel). Acadamy of Science of the USSR, Institute of High Molecular Compound, Moscow-Leningrad.

- Oasmaa A, Leppamaki E, Koponen P, Levander J, Tapola E. Physical characterization of biomass-based pyrolysis liquids. Application of standard fuel oil analyses. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland; 1997.
- Oasmaa A., Kuoppala E., and Solantausta. Fast pyrolysis of forestry residue. 2. physicochemical composition of product liquid. *Energy & Fuels*, 17 (2003): 433-443.
- Oasmaa A., and Kuoppala E. Fast pyrolysis of forestry residue. 3. storage of liquid fuel. *Energy & Fuels*, 17 (2003): 1075-1084.
- Olofsson I., Nordin A. and Soderlind U. Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for cost-efficient medium-scale gasification for biomass to liquids fuels. *ETPC Report*, 2005.
- Power Engineering International* Volume 8 Issue 7, August (2000)
- Peacocke, G. V. C., Bridgwater, A. V., Ablative Fast Pyrolysis of Biomass for Liquids: Results and Analyses, in: *Bio-Oil Production and Utilisation* (Eds. A. V. Bridgwater, E. H. Hogan), CPL Press, Newbury, UK, 1996: 35-48.
- Probstiesn and Hick, *Synthetic fuel*, McGraw Hill (1982)
- Putun A.E, Apayd E, Putun E, "Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis" *Energy* 29 (2004): 2171–2180
- Qi Z., Jie C., Tiejun W and Ying X. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management*, 48 (2007): 87-92.
- Ross Aiken Gortner. *Outline of biochemistry*. USA: John while and sons (1950)
- Scahill JW, Diebold JP, Feik CJ. Removal of residual char fines from pyrolysis vapors by hot gas filtration. In: Bridgwater AV, editor. *Developments in thermochemical biomass conversion*. London: Blackie Academic & Professional; 1997. P. 253
- Scott, D. S., Piskorz, J., Radlein, D., Liquid products from the continuous flash pyrolysis of biomass. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development* 24 (1985): 581-586.
- Scott, D. S., and Piskorz, J., and Radlein, D. (1993) . In. *Energy from Biomass and wastes VII.*, (D. L. Klass, ed.), p.797. Institute of Gas Technology, Chicago



- Sensoz, S., Angin, D., Yorgun, S. Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (Brassica naous L.): fuel properties of bio-oil. **Biomass & Bioenergy** 19 (2000) : 271-279.
- Serdar, Y. Pyrolysis of biomass to product fuels and chemical feedstocks. **Energy Conversion & Management** 45 (2004): 651-671.
- Su-Hwa Jung, Bo-Sung Kang, Joo-Sik Kim. Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 82 (2008): 240–247
- Tanaka H.Putalum W.Tsuzaki C.Shoyama Y.Seebauer V. Petek J. and Staudinger G. Effect of particles size, heating rate and pressure on measurement of pyrolysis kinetics by thermogravimetric analysis. **Fuel** 76 (1997): 1277-1282.
- Walter, F. P., David, K. S. V.C., Douglas, E. L.R.A et.al. Energy Resources, Conversion, and Utilization. The McGraw-Hill Companies, Inc. All 2008
- Westerhof J.M., Kuipers J.M., Kersten R.A. and Swaaij P.M. Controlling the water content of biomass fast pyrolysis oil. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, (2007) 46: 9238-9247.
- Williams, P.T., Reed, A.R., 2003. Pre-formed activated carbon matting derived from the pyrolysis of biomass natural fibre textile waste. **J. Anal. Appl. Pyrol.** 70, 563– 577
- Worasuwannarak N, Sonobe T, Tanthapanichakoon W., Pyrolysis behavior of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 78 (2007) : 265-271
- Xianwen D., Chuangzhi W., Haibin Li, and Yong C., The Fast Pyrolysis of Biomass in CFB reactor. **Energy Fuels** 14 (2000): 552-557
- Zanzi R., Sjostrom K. and Bjornbom E. Rapid high temperature pyrolysis of biomass in a free fall. **Fuel** 75 (1996): 545-550
- Zheng Ji-lu, Yi Wei-ming, Wang Na-na. Bio-oil production from cotton stalk. **Energy Conversion and Management** 49 (2008): 1742-1730.
- Zheng Ji-lu. Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: Yield and relates properties and improvement of pyrolysis system. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 80 (2007): 30-35



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

## การคำนวณ

## 1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว (Daf)} = 100 \times \left[ \frac{W_{Liq}}{W_{Daf}} \right]$$

## 2. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง (Daf)} = 100 \times \left[ \frac{W_R}{W_{Daf}} \right]$$

## 3. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (Daf)} = 100 - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว} - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

โดย

$$W_{Daf} = \text{น้ำหนักของผักตบเริ่มต้นที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_R = \text{น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้น}$$

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

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์คุณสมบัติของแข็ง

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

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

#### หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยจากของแข็ง ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของของแข็งที่หายไป

#### เครื่องมือ

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

#### วิธีการทดลอง

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

#### การคำนวณ

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

เมื่อ  $M$  = ร้อยละของปริมาณความชื้น

$W_1 =$  น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็งเริ่มต้นก่อนอบ  
(กรัม)

$W_2 =$  น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็งเริ่มต้นก่อนอบ  
(กรัม)

$W =$  น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

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

### หลักการ

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

### เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

### วิธีการทดลอง

1. ปิดฝา และเผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง (หรืออาจใช้ตัวอย่างของแข็งที่ผ่านการอบหาความชื้นแล้ว)
3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งพร้อมฝา เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องปิดฝาค่อย ๆ ให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ทำให้อุณหภูมิของเตาเผาถึง 400-500 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส เเผาของแข็งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
4. นำถ้วยกระเบื้องและฝาดออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

### การคำนวณ

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

เมื่อ

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

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

#### หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งที่หายไป

#### เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ครุชชีเบลทำจากนิกเกิลพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

#### วิธีการทดลอง

1. เเผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำออกจากเตาเผา ที่ตั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
3. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยนิกเกิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิทบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำถ้วยนิกเกิลพร้อมตัวอย่างของแข็งเผาในเตาเผาแบบท่อ ให้ความร้อนแก่ของแข็งที่บริเวณด้านบนของเตาเผาแบบท่อนาน 3 นาที และบริเวณกลางเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อีก 7 นาที ตามลำดับ
5. นำถ้วยนิกเกิลออกจากเตาเผา ที่ตั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของถ้วยนิกเกิลพร้อมฝาและของแข็งที่เหลือบันทึกผล

#### การคำนวณ

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

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น
	$W_5$	=	น้ำหนักของครุซีเปิดพร้อมฝาและน้ำหนักของของแข็งก่อนเผา (กรัม)
	$W_6$	=	น้ำหนักของครุซีเปิดพร้อมฝาและน้ำหนักของแข็งหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักตัวอย่างของแข็งเริ่มต้น (กรัม)

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างของแข็ง

##### การคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = ร้อยละความชื้น - ร้อยละเถ้า - ร้อยละสารระเหย

## 2. การหาค่าความร้อนของของแข็ง (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter : ASTM D2015)

### หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบ ๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิ น้ำ (ก่อนและหลังจุดระเบิด) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ภายใต้ภาวะเดียวกัน

### เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter

### สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดเบนโซอิก ( $C_6H_5COOH$ ) ควรได้รับมาตรฐานของ National Institute of Standard and Technology

3. เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) เมทิลเรด (Methyl Red) หรือเมทิลเพอเพิล (Methyl Purple)
4. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
5. สารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.0709 นอร์มัล (3.76 กรัมต่อลิตร) สารละลายนี้ปริมาตร 1 มิลลิลิตรมีค่าเท่ากับ 1 แคลอรี
6. น้ำล้างบอมบ์ ละลายสารละลายเมทิลออเรนจ์อิ่มตัว 1 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 1 ลิตร

### การวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ให้ลวดแตะผิวตัวอย่างของแข็งในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ และต้องเท่ากันทุกครั้ง ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิประมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิตั้งที่และต่ำกว่าอุณหภูมิของห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิตั้งที่
8. เมื่ออุณหภูมิตั้งที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_i$ ) กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุก ๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิตั้งที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย ( $T_f$ )
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อย ๆ ลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเฝ้าไหม้ ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้
12. วัดความยาวลวดที่เหลือ บันทึกผล

### การคำนวณ



$$E = \frac{[(Hg) + e_1 + e_2]}{T}$$

เมื่อ

E = ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (จุลต่อองศาเซลเซียส)

H = ความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (จุลต่อกรัม)

g = น้ำหนักกรดเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)

$e_1$  = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 บีบียู

$e_2$  = ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร)  $\times$  ค่าความร้อนของหลอด (บีบียูต่อเซนติเมตร)

T =  $T_f - T_i$  ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิกเป็นของแข็งแล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_v(\text{gross}) = \frac{[(TE) - e_1 - e_2 - e_3]}{g}$$

เมื่อ  $Q_v(\text{gross})$  = ค่าความร้อนของของแข็ง (จุลต่อกรัม)

T =  $T_f - T_i$  (องศาเซลเซียส)

$e_1$  = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 จูล

$e_2$  = ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร)  $\times$  ค่าความร้อนของหลอด (จุลต่อเซนติเมตร)

$e_3$  =  $25 \times 10^3$  (จูล)  $\times$  รัอยละกำมะถัน  $\times$  น้ำหนักของแข็งที่ใช้ (กรัม)

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3. การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรวม (Standard Test Method for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D3172 Method B : Bomb Washing Method)

#### หลักการ

กำมะถันจากน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์ จะถูกทำให้อยู่ในรูปตะกอนแบเรียมซัลเฟต ( $\text{BaSO}_4$ )

#### เครื่องมือ

1. เตาเผา (Muffle Furnace)
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด
3. โทคูดความชื้น

#### สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc.  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ความถ่วงจำเพาะ 0.90
3. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (1+10) โดยผสมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 10 ส่วนโดยปริมาตร
4. กรดไฮโดรคลอริก (1+1) โดย ผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 1 ส่วนโดยปริมาตร
5. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ( $\text{BaCl}_2$ ) ละลายแบเรียมคลอไรด์ 100 กรัมในน้ำกลั่นและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
6. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.43 กรัมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายให้เป็น 100 มิลลิลิตร
7. กระดาษกรองเบอร์ 1 และเบอร์ 42

#### วิธีการทดลอง

1. นำน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์และไตเตรตแล้วมาปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (จาก pH = 5.5 เป็น pH = 7.0)
2. นำไปต้มจนเดือดแล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างกระดาษกรองให้ทั่วด้วยน้ำร้อน 5-6 ครั้ง

3. เติมกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร นำไปต้มและเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตรทีละน้อยด้วยปิเปต คนให้ทั่วตลอดเวลา ต้มต่อให้เดือดอีก 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ ค้างคืนหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
4. กรองตะกอนแบเรียมซัลเฟตด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดแบเรียมคลอไรด์ (ทดสอบได้ด้วยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในน้ำล้างตะกอน 8-10 มิลลิลิตรแล้วน้ำไม่ขุ่น)
5. นำกระดาษกรองที่มีตะกอนแบเรียมซัลเฟตใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ห่อกระดาษหลวม ๆ เพื่อป้องกันตะกอนกระเด็นออกจากถ้วย
6. เตาที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ นำออกจากเตาเผา ปิดฝาและทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
7. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

#### การคำนวณ

$$\text{ร้อยละกำมะถันรวม} = 13.738 \times (A - B)/C$$

- เมื่อ
- |   |   |  |             |
|---|---|--|-------------|
| A | = | น้ำหนักรวมของตะกอนแบเรียมซัลเฟต ( $\text{BaSO}_4$ ) จากตัวอย่าง และครุซีเบล (กรัม) | จากตัวอย่าง |
| B | = | น้ำหนักของครุซีเบล (กรัม)  |             |
| C | = | น้ำหนักของแข็งเริ่มต้น (กรัม)  |             |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ค**  
**การวิเคราะห์คุณสมบัติผลิตภัณฑ์เหลว**

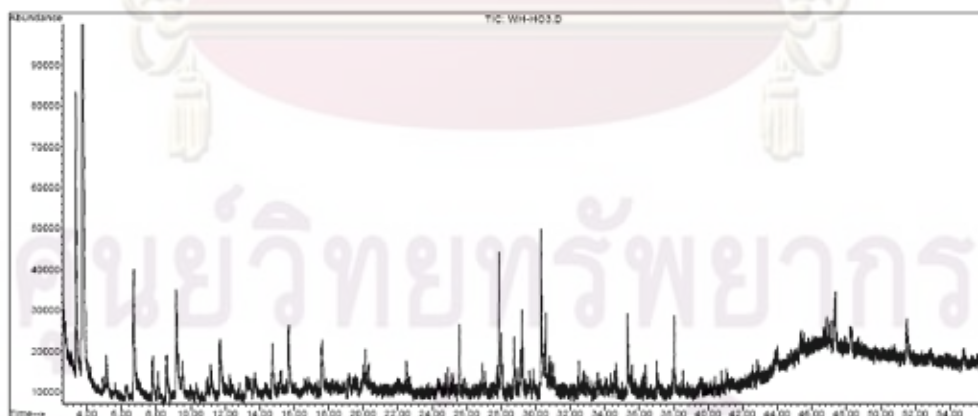
ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปี

File : D:\CIP2009\KAI\CIPSA118\WH-L0.D  
Operator : SIRICHAI K.  
Acquired : 14 Sep 2009 19:27 using AcqMethod CIPSA118  
Instrument : Instrumen  
Sample Name: WH-LIGHT OIL  
Misc Info : WH-LIGHT OIL/ ACETONE 3 uL SP 1/2 RAMP10C/MIN  
Vial Number: 6



(ก)

File : D:\CIP2009\KAI\CIPSA118\WH-H03.D  
Operator : SIRICHAI K.  
Acquired : 14 Sep 2009 16:18 using AcqMethod CIPSA118  
Instrument : Instrumen  
Sample Name: WH-H03  
Misc Info : WH-H03 IN ACETONE 3 uL SP 1/2 RAMP 5C/MIN  
Vial Number: 4



(ข)

**รูปที่ ค** โครมาโทแกรมขององค์ประกอบต่าง ๆ ของ (ก) น้ำมันเบาจากไพโรไลซิสผักตบชวา

(ข) น้ำมันหนักจากการไพโรไลซิสผักตบชวา

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุพจน์ แหวนเพชร เกิดวันที่ 12 มิถุนายน 2526 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย