การผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

นายศิวัช ภู่ระหงษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIO-OIL PRODUCTION FROM EUCALYPTUS SAWDUST BY CONTINUOUS PYROLYSIS

Mr. Siwat Purahong

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง
โดย	นายศิวัช ภู่ระหงษ์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. อภิญญา ดวงจันทร์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ศิวัช ภู่ระหงษ์ : การผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง (BIO-OIL PRODUCTION FROM EUCALYPTUS SAWDUST BY CONTINUOUS PYROLYSIS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 96 หน้า.

การศึกษาปัจจัยของการบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัส โดยตัวแปรขนาดอนุภาคสี่ระดับ คือ 250-500 ไมโครเมตร ระหว่าง 500-850 ไมโครเมตร ระหว่าง 850-1080 ไมโครเมตร และ 1080-2000 ไมโครเมตร โดยปัจจัยนี้ถูกนำมาวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสพบว่าที่ขนาดที่เหมาะสมคือ 500-850 ไมโครเมตรให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุด การออกแบบทดลองแบบการออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับสำหรับทดสอบตัวแปรอุณหภูมิ 450 และ 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 0 และ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการป้อนสาร 200 และ 600 รอบต่อนาที จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพคือ อุณหภูมิในการไพโรไลซิส อัตราการป้อนสาร และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (แก๊สตัวพา) การนำผลการทดลองที่ได้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert (เวอร์ชัน 7.0.0) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้น้ำมันชีวภาพสูงสุด พบว่าจะได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 52.67 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากนั้นนำน้ำมันชีวภาพไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) เพื่อหาองค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชั่นของพบว่า ออกซิเจนทำพันธะเดี่ยวกับไฮโดรเจน คาร์บอนทำพันธะเดี่ยวกับไฮโดรเจน คาร์บอนทำพันธะคู่กับออกซิเจน คาร์บอนทำพันธะคู่กับคาร์บอน และคาร์บอนทำพันธะเดี่ยวกับออกซิเจน และเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟฟี-แมสสเปคโตรเมททรี (GC-MS) พบว่ามีสารประกอบของอนุพันธ์ของฟีนอล แอลกอฮอร์ และคีโตนเป็นส่วนใหญ่

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2557		

5472117423 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY
KEYWORDS: BIO-OIL / BIOMASS / PYROLYSIS / EUCALYPTUS SAWDUST / PYROLYSIS BIOMASS

SIWAT PURAHONG: BIO-OIL PRODUCTION FROM EUCALYPTUS SAWDUST BY CONTINUOUS PYROLYSIS. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, Dr. de L'INPT, 96 pp.

This research aims to study the effect of continuous pyrolysis from Eucalyptus sawdust. 4 ranges of particle sizes (250-500, 500-850, 850-1080 and 1080-2000 micrometer) were used to investigate the suitable of particle sizes of Eucalyptus sawdust for pyrolysis process. It was found that the particle size of 500-850 micrometer gave the highest yield of bio-oil product. 2k factorial design used to investigated 3 parameters include temperature of 450 and 650 degree Celsius, nitrogen gas feed rate of 0 and 200 cm^3/min and biomass feed rate of 200 and 600 rpm. The factors effect on bio-oil product is temperature, nitrogen gas feed rate and biomass feed rate. The mathematical simulation by using Design Expert program shown optimum condition was at 450 degree Celsius of temperature, 200 cm^3/min of nitrogen gas feed rate and 200 rpm of biomass feed rate given bio-oil product is 52.67 %wt. FT-IR technique was used to analyzed composition and functional group of this bio-oil. FT-IR spectroscopy detects C-O single bond, O-H single bond, C-H single bond, C-O double bond and C-C double bond. The physical and chemical properties of bio-oil products were analyzed by GC-MS. It was found that bio-oil compose derivatives of phenol, alcohol and ketone.

Department:	Chemical Technology	Student's Signature	....
Field of Study:	Fuel Technology	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2014		

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้ง คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อภิญญา ดวงจันทร์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสระบุรีที่สนับสนุนเครื่องมือวิเคราะห์และสถานที่ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ คอยมอบความรักความเป็นห่วงเป็นใย ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน และสนับสนุนข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมาจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.................... จ

กิตติกรรมประกาศ.................... ฉ

สารบัญ.................... ช

สารบัญตาราง.................... ฐ

สารบัญรูปภาพ.................... ฒ

บทที่ 1 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.................... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.................... 3

1.4 ขอบเขตการวิจัย 3

1.5 วิธีดำเนินการทดลอง 3

บทที่ 2 5

2.1 ปิโตรเลียม.................... 5

2.1.1 น้ำมันดิบ (Crude Oil).................... 6

2.1.2 ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas).................... 7

2.2 พลังงานทดแทน.................... 9

2.2.1 ประเภทของพลังงานทดแทน.................... 9

2.3 ชีวมวล 12

2.3.1 ศักยภาพชีวมวล.................... 13

2.4 องค์ประกอบของชีวมวล 16

2.4.1 เซลลูโลส.................... 16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส 17
2.4.3 ลิกนิน 18
2.5 องค์ประกอบของชีวมวล 20
2.5.1 ความชื้น (Moisture) 20
2.5.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) 20
2.5.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือขี้เถ้า (Ash) 20
2.6 พลังงานที่ได้จากชีวมวล 20
2.7 ข้อดีข้อเสียของพลังงานชีวมวล 22
2.7.1 การเผาไหม้ 23
2.7.2 ลิควิแฟกชั่น 25
2.7.3 แก๊สซิฟิเคชั่น 26
2.8 ไพโรไลซิส 28
2.8.1 กลไกการไพโรไลซิส 29
2.8.1.1 เซลลูโลส 30
2.8.1.2 เฮมิเซลลูโลส 32
2.8.1.3 ลิกนิน 33
2.9 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการไพโรไลซิส 34
2.9.1 องค์ประกอบของชีวมวล 34
2.9.2 อุณหภูมิในการไพโรไลซิส (Temperature) 34
2.9.3 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 35
2.9.4 ขนาดของอนุภาค (Particle size) 36
2.9.5 ความดัน (Pressure) 36
2.9.6 เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Residence time) 36

หน้า

2.9.7 อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas) 37
2.10 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส 37
2.10.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง 37
2.10.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว 37
2.10.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส 38
2.11 น้ำมันชีวภาพ 38
2.11.1 ลักษณะทั่วไป 38
2.11.2 สมบัติของน้ำมันชีวภาพ 40
2.11.3 การนำน้ำมันชีวภาพไปประยุกต์ใช้ 41
2.12 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ 42
2.12.1. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) 42
2.12.2. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน 42
2.11.3. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) 43
2.11.4. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) 44
2.11.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (Auger reactor) 45
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 46
บทที่ 3 48
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 48
3.2 สารตัวอย่างและสารเคมีทีใช้ในการทดลอง 52
3.3 วิธีการทดลอง 54
3.4 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง 55
บทที่ 4 56

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส 56
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และค่าความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส 56
4.1.2 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคการแยกสกัด 57
4.1.3 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric analysis, TG/DTA) 58
4.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-Ray Fluorescence) 59
4.2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ 60
4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ 60
4.2.2 ผลของปัจจัยต่างๆจากการออกแบบการทดลองเชิงซ้อนสองระดับ 62
4.2.3 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง 66
4.2.4 ปัจจัยของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น 68
4.2.5 ผลของอัตราการป้อนสารต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง 69
4.2.6 ผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง 71
4.3 การคำนวณหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องโดยใช้โปรแกรม design-expert 73
4.4 ศึกษาอัตราส่วนน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ 75
4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ 76
4.5.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์........ 76
4.5.2 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ 77

หน้า

4.5.3.1 ค่าความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมันชีวภาพ....................................... 77

4.5.3.2 ขี้เถ้าและปริมาณของแข็งในน้ำมันชีวภาพ 77

4.5.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH and total acid value) 78

4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ.. 78

4.6.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโครปี (H-NMR).. 78

4.6.2 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ- แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) 80

4.6.3 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) 83

บทที่ 5 85

5.1 สรุปผลการทดลอง 85

5.1.1 สมบัติพื้นฐานของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส 85

5.1.2 ค่าการสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส 85

5.1.3 การวิเคราะห์หาธาตุโลหะหนักของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส... 85

5.1.4 ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง... 86

5.1.5 ปัจจัย อุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน ที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง 86

5.1.6 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ 86

5.1.7 สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ 86

5.2 ข้อเสนอแนะ 87

รายการอ้างอิง 88

ภาคผนวก ก. 92

หน้า

ภาคผนวก ข. 94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	องค์ประกอบของชีวมวลแต่ละชนิด	21
2.2	ปฏิกิริยาคายความร้อนของเซลลูโลส	31
2.3	ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ	39
2.4	สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ	40
3.1	แสดงปัจจัยและระดับที่ใช้ในการศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไรซิสแบบต่อเนื่อง	53
3.2	จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับประสมกลางเพื่อการศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	53
4.1	proximate analysis and ultimate analysis	57
4.2	ส่วนประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในขี้เลื่อยยูคาลิปตัส	57
4.3	ปริมาณโลหะในขี้เลื่อยยูคาลิปตัส	59
4.4	ผลของอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	60
4.5	ผลทางสถิติของผลของอนุภาคของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ	60
4.6	ร้อยละผลิตภัณฑ์ของการผลิตน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	62
4.7	ผลทางสถิติของการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของการผลิตน้ำมันชีวภาพ	63
4.8	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	66
4.9	ผลทางสถิติของอิทธิผลของอุณหภูมิต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ	66
4.10	ผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	69
4.11	ผลทางสถิติของอิทธิผลของอัตราการป้อนสารต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ	69
4.12	ผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	71
4.13	ผลทางสถิติของอิทธิผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ	71
4.14	ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง		หน้า
4.15	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Design-Expert ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง...........................	73
4.16	ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง..	74
4.17	ร้อยละของน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก..	75
4.18	แสดงองค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์.........................	76
4.19	สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ...	77
4.20	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (H-NMR)..	79
4.21	องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ..	81
	องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ(ต่อ)...	82
4.22	หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)..	84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 พาราฟินที่พบในน้ำมันดิบ 6
2.2 แนฟทีนที่พบในน้ำมันดิบ........ 7
2.3 แอโรมาติกที่พบในน้ำมันดิบ........ 7
2.4 โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง........ 16
2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส........ 17
2.6 ลักษณะการสานกันเป็นร่างแหของเซลลูโลส........ 17
2.7 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส........ 18
2.8 โครงสร้างของลิกนิน 19
2.9 กระบวนการแปรรูปทางความร้อนของชีวมวล........ 23
2.10 ปฏิกิกริยาที่เกิดในน้ำความดันและอุณหภูมิ........ 25
2.11 แผนผังปฏิกิริยาลิควิแฟคชั่นเบื้องต้น........ 26
2.12 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส........ 28
2.13 กลไกสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ........ 30
2.14 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลาง........ 31
2.15 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง........ 32
2.16 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน........ 33
2.17 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ........ 42
2.18 เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน........ 43
2.19 เครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ........ 44
2.20 เครื่องปฏิกรณ์แบบแอบลาทีฟ........ 45
2.21 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน........ 45
3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง........ 48
3.2 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง........ 59
3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบกับแมสสเปกโทรมิเตอร์........ 50
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี........ 50
3.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN2000........ 51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพ		หน้า
3.6	เครื่องวิเคราะห์หาค่าความร้อนรุ่น Parr 6200 Calorimeter	51
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TG) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ความดันบรรยากาศไนโตรเจนที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที......................................	58
4.2	ผลของอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์...	61
4.3	กราฟ Half Normal probability plot	64
4.4	กราฟ normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวของการไพโรไลซิสขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง..............................	64
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง residuals กับ predicted ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวของการไพโรไลซิสขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.........	65
4.6	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์...	67
4.7	ผลของอุณหภูมิต่อแก๊สที่เกิดขึ้น...	68
4.8	ผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์...	70
4.9	แสดงผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์...................	72
4.10	น้ำมันเบาและน้ำมันหนัก..	75
4.11	ภาพการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (H-NMR)	78
4.12	โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัส..	80
4.13	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจและการดำเนินชีวิตประจำวันและปัจจัยที่ทำให้ประเทศขับเคลื่อนไปข้างหน้าทั้งในด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรมในแต่ละปี ความต้องการใช้พลังงานมีอัตราที่สูงขึ้น พลังงานภายในประเทศมีแนวโน้มที่จะลดน้อยลงประกอบกับการที่ประเทศไทยต้องพึ่งพาพลังงานนำเข้าจากต่างประเทศเช่น แก๊สธรรมชาติ และได้รับผลกระทบจากวิกฤติราคาน้ำมันที่สูงขึ้น ดังนั้นการหาพลังงานทดแทนจากพลังงานฟอสซิล เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ ซึ่งสามารถที่จะแก้ไขการขาดดุลการค้าเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีของเหลือจากชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรกรรมเป็นจำนวนมาก โดยส่วนมากจะกำจัดโดยการเผาทิ้งซึ่งการเผาทิ้งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปอย่างไร้ประโยชน์ การนำชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยการแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป เช่น แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน ทั้งยังช่วยส่งเสริมการประกอบอาชีพของเกษตรกร เป็นต้น อีกทั้ง ชีวมวลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเป็นเชื้อเพลิงสะอาดซึ่งปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่ำกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล [1] ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ที่ส่งผลต่อภาวะโลกร้อน (Global warming)

ชีวมวล (Biomass) [2] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบได้จากการสีข้าว เปลือกชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น และยังมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบทั้งคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ ที่สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้พลังงานทางเคมีของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ได้

ชีวมวล ซึ่งมีทั้งเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาล และพอลิเมอร์ของน้ำตาลหรือพอลิแซกคาไรด์ (Polysaccharides) ที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขี้เลื่อยของยูคาลิปตัสซึ่งเป็นพืชที่สำคัญต่ออุตสาหกรรมกระดาษ เนื่องจากเป็นพืชที่เลี้ยงดูง่าย เติบโตได้รวดเร็วจึงเป็นที่นิยมปลูกของเกษตรกรและพบว่าเศษวัสดุเหลือทิ้งมากที่สุดถึง 1.8 ล้านตันต่อปี และมีการนำกลับมาใช้แค่ 5 แสนตันต่อปีจึงทำให้เหลือเศษวัสดุเหลือใช้มากถึง 1.3 ล้านตันต่อปี

เทคโนโลยีสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล [3] คือ การนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปโดยนำชีวมวลให้ความร้อนและกลายเป็นของเหลว ซึ่งสามารถที่จะเปลี่ยนให้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียม มีกระบวนการดังนี้

1. กระบวนการทางชีวภาพ โดยทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ คือแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชผลทางการเกษตรให้เป็นเอทานอล เพื่อนำมาผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราที่เหมาะสมหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการผลิตนาน
2. กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยทำการสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จึงนำน้ำมันที่ได้ผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์เพื่อผลิตไบโอดีเซล กระบวนการนี้จะเกิดกลีเซอรอลซึ่งเป็นของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการ
3. กระบวนการใช้ความร้อนสูงซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการ คือแกซิฟิเคชัน (Gasification) การทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction) การเผาไหม้ (Combustion) และไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการหนึ่งในการแปรรูปชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งเชื้อเพลิงเหลวที่ได้เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ ซึ่งน้ำมันชีวภาพจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีดำ มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบโดยมีสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohols) แอลดีไฮด์ (Aldehydes) คีโตน (Ketone) กรดแอซิติก (Acetic acid) ฟูแรน (Furans) และแอนไฮดัสซูการ์ (Anhydrous sugar) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสโดยการแตกสายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นไอระเหยและผ่านการควบแน่นเป็นของเหลวแยกเป็น 2 ชั้นโดยน้ำมันเบา (Light oil) อยู่ชั้นบนและน้ำมันหนัก (Heavy oil) อยู่ชั้นล่างงานวิจัยนี้สนใจในการนำขี้เลื่อยจากไม้ยูคาลิปตัสที่มีอยู่ในโรงงานเป็นจำนวนมาก ซึ่งโดยปกติโรงงานจะกำจัดโดยการเผาทิ้ง งานวิจัยมีการศึกษาตัวแปรที่จะส่งผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ขนาดของชีวมวล อัตราการป้อนสาร และแก๊สตัวพาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ รวมถึงศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยวิธีไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องเพื่อให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.) ศึกษาตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัส
2.) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิ ขนาดของชีวมวล อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนและอัตราการป้อนชีวมวลที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้ รวมถึงหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

1.5 วิธีดำเนินการทดลอง

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัย
3. ศึกษาสมบัติของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส
   - ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล
   - ศึกษาอุณหภูมิในการสลายทางความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/Differential Thermal Analysis(TG/DTA)
   - องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis) : ASTM D3172, D3173,D3174และ D3175 เพื่อหา สารระเหย ความชื้น เถ้า และคาร์บอนคงตัว
   - องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) : ASTM D3176 เพื่อหาปริมาณ คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน
   - ปริมาณค่าความร้อน : ASTM D2015
4. ออกแบบการทดลองโดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ
   - ขนาดอนุภาคของชีวมวลที่ 0.25-0.5,0.5-0.85,0.85 -1 และมากกว่า 1 มิลลิเมตร
   - อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ที่ 450 และ 550 องศาเซลเซียส
   - อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 0 และ 200 ลูกบากศ์เซนติเมตรต่อนาที
   - อัตราการป้อนสารที่ 200 และ 600 รอบต่อนาที
   - โดยขนาดอนุภาคศึกษาตัวแปรเดียวและปัจจัยอุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนศึกษาโดยการออกแบบการทดลองสองระดับ
5. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ด้วย
   - วิเคราะห์หาชนิดองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโทรเมตรี (GC-MS) เพื่อวิเคราะห์หาชนิดขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์
   - วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

- ศึกษาจำนวนโปรตอนในโครงสร้างพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ (H^1-NMR)
- องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) : ASTM D3176 เพื่อหาปริมาณ คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน
- ปริมาณค่าความร้อน : ASTM D2015
- วิเคราะห์ความเป็นกรด-เบสของน้ำมันชีวภาพ

6. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแก๊สที่ได้ โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟเพื่อหาค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์
7. วิเคราะห์ถ่านชาร์ด้วยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม [1] หรือ น้ำมันดิบเป็นของเหลวไวไฟที่เกิดเองตามธรรมชาติ ประกอบด้วยสารผสมซับซ้อนระหว่างไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน กับสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นของเหลวอื่น ๆ ซึ่งพบในชั้นธรณีวิทยาใต้ผิวโลก เป็นเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ เกิดได้จากซากสิ่งมีชีวิต จำนวนมากทับถมกันใต้หินตะกอนและได้รับความร้อนและความดันมหาศาล

ปิโตรเลียม [4] เกิดจากการทับถมและสลายตัวของอินทรีย์สารจากพืชและสัตว์ที่คลุกเคล้าอยู่กับตะกอนในชั้นกรวดทรายละโคลนตมใต้พื้นดิน เมื่อเวลาผ่านไปนับล้านปีตะกอนเหล่านี้จะจมตัวลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก ถูกอัดแน่นด้วยความดันและความร้อนสูง รวมทั้งอยู่ในบริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด จึงสลายตัวเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติแทรกอยู่ระหว่างชั้นหินที่มีรูพรุน ปิโตรเลียมจากแหล่งต่างกันจะมีปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งปริมาณสารประกอบของกำมะถันไนโตรเจน และออกซิเจนแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของซากพืชและสัตว์ที่เป็นต้นกำเนิดของปิโตรเลียมนั้น รวมถึงอิทธิพลของแรงที่ทับถมอยู่บนตะกอน ปิโตรเลียมที่เกิดอยู่ในชั้นหินจะมีการเคลื่อนตัวออกไปตามรอยแตกและรูพรุนของหินไปสู่ที่มีระดับความลึกเล็กน้อยกว่าแล้วสะสมตัวอยู่ในโครงสร้างหินที่มีรูพรุน มีโพรงหรือรอยแตกในเนื้อหินที่สามารถให้ปิโตรเลียมสะสมตัวอยู่ได้ ด้านบนเป็นหินตะกอนหรือหินดินดานเนื้อแน่นละเอียดปิดกั้นไม่ให้ปิโตรเลียมไหลลอดออกไปได้ โครงสร้างปิดกั้นดังกล่าวนี้เรียกว่า แหล่งกักเก็บปิโตรเลียม ปิโตรเลียมมีธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน และอาจมีธาตุอโลหะชนิดอื่นปนอยู่ด้วย เช่นกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน

ปิโตรเลียมแบ่งตามสถานะในธรรมชาติได้ 2 ชนิด

น้ำมันดิบ (Crude Oil)

ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)

2.1.1 น้ำมันดิบ (Crude Oil)

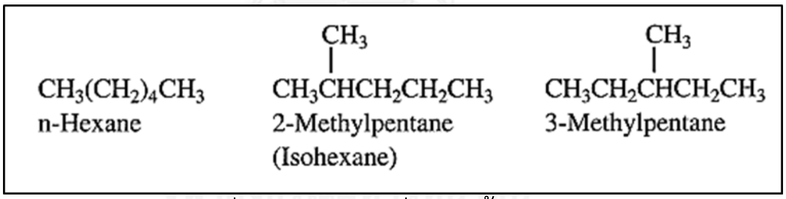
น้ำมันดิบจากแหล่งที่มาต่างๆ อาจมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน [5] เช่น มีลักษณะข้นเหนียวจนถึงหนืดคล้ายยางมะตอย มีสีเหลือง เขียว น้ำตาลจนถึงดำ น้ำมันดิบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ พาราฟิน (paraffin) แนฟทีน (naphthenes) และแอโรแมติก (aromatics) นอกจากนี้อาจมีสารประกอบของไนโตรเจน กำมะถัน และสารประกอบออกไซด์อื่นๆเจือปนอยู่

1. พาราฟิน (paraffin) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ประกอบด้วย

-นอร์มัลพาราฟิน คือ พาราฟินแบบโซ่ตรง เช่น นอร์มัลเฮกเซน (n-Hexane)

-ไอโซพาราฟิน คือ พาราฟินที่มีหมู่เมทิลต่อยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 เช่น ไอโซเฮกเซน (Isohexane)

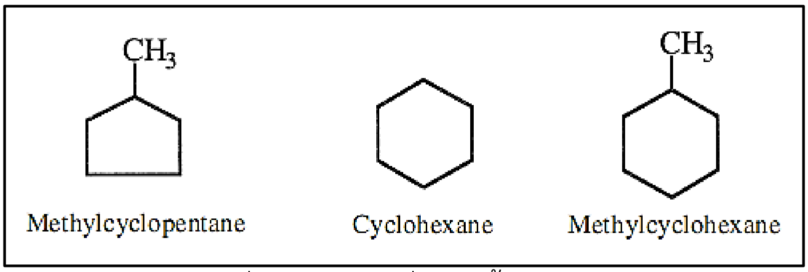
-พาราฟินแบบกิ่ง คือ พาราฟินที่มีกิ่งหรือสาขาแตกออกจากสายโซ่โมเลกุลหลัก ซึ่งมีหมู่แอลคิลต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งต่างๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งที่ 2 และมักจะเป็นหมู่เมทิลมากกว่าหมู่แอลคิลอื่นๆ เช่น 3-เมทิลเพนเทน (3-Methylpentane) ซึ่งพาราฟินทั้งสามจะมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 พาราฟินที่พบในน้ำมันดิบ [6]

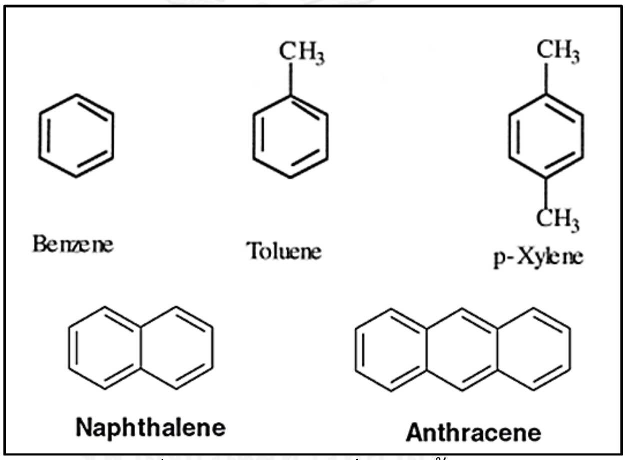
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. แนฟทีน เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหรือเรียกว่า ไซโคลแอลเคน แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียมส่วนใหญ่เป็นวงขนาดห้าเหลี่ยม และหกเหลี่ยม ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.2 แนฟทีนขนาดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมค่อนข้างไวต่อปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากความเครียดของวงจึงมักเปลี่ยนเป็นสารอื่น แนฟทีนที่เป็นวงห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยมสามารถเปลี่ยนให้เป็นสารแอโรแมติกได้ โดยการทำให้ไฮโดรเจนหลุดออกจากโมเลกุล



ภาพที่ 2.2 แนฟทีนที่พบในน้ำมันดิบ [6]

3. แอโรแมติก เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหกเหลี่ยม มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เช่น เบนซีน เป็นต้น มักพบในส่วนกลั่นหนักอนุพันธ์ของเบนซีนได้แก่ โทลูอีน และไซลีน มักพบมากที่สุดอยู่ในปิโตรเลียม สารที่มีวงแอโรแมติกหลายวงแนบต่อกัน เช่น แนฟทาลีนและแอนทราซีน เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 แอโรมาติกที่พบในน้ำมันดิบ

2.1.2 ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)

แก๊สธรรมชาติ [6] มีองค์ประกอบหลักคือ สารประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนในโมเลกุล 1 - 5 อะตอม ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 85-95 ที่เหลือเป็นแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ บางครั้งจะพบแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ปะปนอยู่ด้วย

ก๊าซธรรมชาตินอกจากจะมีสถานะเป็นแก๊สแล้วยังรวมถึง แก๊สธรรมชาติเหลว ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนกลุ่มเดียวกับแก๊สธรรมชาติแต่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมากกว่า เมื่ออยู่ในแหล่งกักเก็บใต้ผิวโลกที่ลึกมากและมีอุณหภูมิสูงมากจะมีสถานะเป็นแก๊ส เมื่อนำขึ้นมาถึงระดับผิวดินซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ไฮโดรคาร์บอนจะกลายสภาพเป็นของเหลวจึงเรียกว่าแก๊สธรรมชาติเหลว

เราสามารถใช้ประโยชน์จากแก๊สธรรมชาติได้ใน 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิง เราสามารถใช้แก๊สธรรมชาติได้โดยตรง ด้วยการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า หรือในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมสุขภัณฑ์ ฯลฯ หรือสามารถนำมาใช้ในระบบ Co-generation และใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ ที่เรียกว่าแก๊สธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural Gas for Vehicles: NGV)

2. ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หลังผ่านกระบวนการแยกในโรงแยกแก๊ส เพราะในแก๊สธรรมชาติ มีสารประกอบที่เป็นประโยชน์อยู่มากมาย เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแยกที่โรงแยกแก๊สแล้วก็จะได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

ก๊าซมีเทน (C1) : ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรม และนำไปอัดใส่ถังด้วยความดันสูง เรียกว่าแก๊สธรรมชาติอัด สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ รู้จักกันในชื่อว่า "แก๊สธรรมชาติสำหรับยานยนต์" (Natural Gas for Vehicles : NGV)

ก๊าซอีเทน (C2) : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น สามารถนำไปใช้ผลิตเม็ดพลาสติก เส้นใยพลาสติกชนิดต่างๆ เพื่อนำไปใช้แปรรูปต่อไป

ก๊าซโพรเพน (C3) และแก๊สบิวเทน (C4) : แก๊สโพรเพนใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้นได้เช่นเดียวกัน และหากนำเอาแก๊สโพรเพนกับแก๊สบิวเทนมาผสมกัน อัดใส่ถังเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas - LPG) หรือที่เรียกว่าแก๊สหุงต้ม สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ และใช้ในการเชื่อมโลหะได้ รวมทั้งยังนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทได้อีกด้วย

ไฮโดรคาร์บอนเหลว (Heavier Hydro carbon) : อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ เมื่อผลิตขึ้นมาถึงปากบ่อบนแท่นผลิต สามารถแยกจากไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊สบนแท่นผลิต เรียกว่า คอนเดนเสท (Condensate) สามารถลำเลียงขนส่งโดยทางเรือหรือทางท่อ นำไปกลั่นเป็นน้ำมันสำเร็จรูปต่อไป

ก๊าซโซลีนธรรมชาติ แม้ว่าจะมีการแยกคอนเดนเสทออกเมื่อทำการผลิตขึ้นมาถึงปากบ่อบนแท่นผลิตแล้ว แต่ก็ยังมีไฮโดรคาร์บอนเหลวบางส่วนหลุดไปกับไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊ส เมื่อผ่านกระบวนการแยกจากโรงแยกแก๊สธรรมชาติแล้ว ไฮโดรคาร์บอนเหลวเหล่านี้ก็จะถูกแยกออกเรียกว่า แก๊สโซลีนธรรมชาติ หรือ NGL (natural gasoline) และส่งเข้าไปยังโรงกลั่นน้ำมัน เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์น้ำมันสำเร็จรูปได้เช่นเดียวกับ คอนเดนเสท และยังเป็นตัวทำละลายซึ่งนำไปใช้ในอุตสาหกรรมบางประเภทได้เช่นกัน

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ : เมื่อผ่านกระบวนการแยกแล้ว จะถูกนำไปทำให้อยู่ในสภาพของแข็ง เรียกว่าน้ำแข็งแห้ง นำไปใช้ในอุตสาหกรรมถนอมอาหาร อุตสาหกรรมน้ำอัดลมและเบียร์ ใช้ในการถนอมอาหารระหว่างการขนส่ง นำไปเป็น วัตถุดิบสำคัญในการทำฝนเทียม และนำไปใช้สร้างควันในอุตสาหกรรมบันเทิง อาทิ การแสดงคอนเสิร์ต หรือ การถ่ายทำภาพยนตร์

2.2 พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทน [7] โดยทั่วไปหมายถึงพลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และ แก๊สธรรมชาติซึ่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มหาศาลอันเป็นสาเหตุโลกร้อน ตัวอย่างพลังงานทดแทนที่สำคัญเช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ เชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น ในปี 2555 ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเพียง 18.2% ของพลังงานทั้งหมด เพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้า เพียง 1.8% โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์ และเชื้อเพลิงชีวภาพ เพิ่มขึ้น 23% แต่ พลังงานจาก ฟืน ถ่าน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร โดยนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงดั้งเดิม มีอัตราลดลง 10% (อาจเป็นเพราะมวลชีวภาพดังกล่าวถูกแปรรูปไปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพไปแล้ว)

พลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นพลังงานที่ถูกทำขึ้นใหม่ (renewable) ได้อย่างต่อเนื่อง เรียกว่าพลังงานหมุนเวียน (Renewal Energy) ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม น้ำ และไฮโดรเจน เป็นต้น

ตามแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน 15 ปี ระหว่าง 2555-2564 มีแผนที่จะให้มีการใช้พลังงานทดแทนเป็นสัดส่วน 20% ของพลังงานทั้งหมด การศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นการศึกษา ค้นคว้า ทดสอบ พัฒนา และสาธิต ตลอดจนส่งเสริมและเผยแพร่พลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น พลังงานลม แสงอาทิตย์ ชีวมวล และอื่นๆ เพื่อให้มีการผลิต และการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย มีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมทั้งทางด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.1 ประเภทของพลังงานทดแทน

ในปัจจุบันเรื่องพลังงานเป็นปัญหาใหญ่ของโลก และนับวันจะมีผลกระทบรุนแรงต่อมวลมนุษยชาติมากขึ้นทุกที การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยก็เป็นอีกหนึ่งหน่วยงานที่ให้ความสำคัญในการร่วมหาหนทางแก้ไข ทำการศึกษา ค้นคว้า สำรวจ ทดลอง ติดตามเทคโนโลยีอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการนำพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีใหม่ๆในด้านพลังงานทดแทนเข้ามาใช้ในประเทศไทยต่อไป โดยคำนึงถึงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมซึ่งพอจะจำแนกประเภทของพลังงานทดแทนได้ดังนี้

พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์ให้พลังงานจำนวนมหาศาลแก่โลกของเรา พลังงานจากดวงอาทิตย์จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญที่สุด เป็นพลังงานสะอาดไม่ทำปฏิกิริยาใดๆอันจะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็คทรอนิคส์ชนิดหนึ่ง ที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเปลี่ยนเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ส่วนใหญ่เซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจาก

สารกึ่งตัวนำพวกซิลิคอน มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 44 เปอร์เซนต์

พลังงานลม

เป็นพลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 ที่ ซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ใช้แล้วไม่มีวันหมดสิ้นไปจากโลก ได้รับความสนใจนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในขณะเดียวกัน กังหันลมก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้า และในการสูบน้ำ ซึ่งได้ใช้งานกันมาแล้วอย่างแพร่หลายพลังงานลมเกิดจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ตกกระทบโลกทำให้อากาศร้อน และลอยตัวสูงขึ้น อากาศจากบริเวณอื่นซึ่งเย็นและหนาแน่นมากกว่าจึงเข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดลม และมีอิทธิพลต่อสภาพลมฟ้าอากาศในบางพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวฝั่งทะเลอันดามันและด้านทะเลจีน(อ่าวไทย) มีพลังงานลมที่อาจนำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะพลังงานกล (กังหันสูบน้ำกังหันผลิตไฟฟ้า) ศักยภาพของพลังงานลมที่สามารถ นำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับประเทศไทย มีความเร็ว อยู่ระหว่าง 3 - 5 เมตรต่อวินาที และความเข้มพลังงานลมที่ประเมินไว้ได้อยู่ระหว่าง 20 - 50 วัตต์ต่อตารางเมตร

พลังงานความร้อนใต้พิภพ

พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal) หมายถึงการใช้งานอย่างหนักจากความร้อนด้านในของโลก แกนของโลกนั้นร้อนอย่างเหลือเชื่อ โดยร้อนถึง 5,500 องศาเซลเซียส จากการประมาณการเมื่อเร็วๆ นี้ ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจเลยว่าแม้แต่พื้นผิว 3 เมตรด้านบนสุดของโลกก็มีอุณหภูมิใกล้เคียง 10-26 องศาเซลเซียสอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งปี นอกจากนี้กระบวนการทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกันทำให้ในบางที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามาก

พลังงานน้ำ

พื้นผิวโลกถึง 70 เปอร์เซนต์ ปกคลุมด้วยน้ำ ซึ่งมีความสำคัญยิ่งต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย น้ำเหล่านี้มีการเปลี่ยนสถานะและหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา ระหว่างผิวโลกและบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า วัฏจักรของน้ำ น้ำที่กำลังเคลื่อนที่มีพลังงานสะสมอยู่มาก และมนุษย์รู้จักนำพลังงานนี้มาใช้หลายร้อยปีแล้ว เช่น ใช้หมุนกังหันน้ำ ปัจจุบันมีการนำพลังงานน้ำไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า

พลังงานจากขยะ

ขยะชุมชนจากบ้านเรือนและกิจการต่างๆ เป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง ขยะเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพ เช่น กระดาษ เศษอาหาร และไม้ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าที่ถูกออกแบบให้ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิงได้ โรงไฟฟ้าที่ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิง จะนำขยะมาเผาบนตะแกรง ความร้อนที่เกิดขึ้นใช้ต้มน้ำในหม้อน้ำจนกลายเป็นไอน้ำเดือด ซึ่งจะไปเพิ่มแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โรงไฟฟ้าพลังงานจากขยะ

ประเทศไทยประสบปัญหาการจัดการขยะชุมชนมาช้านาน จากการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและสังคมอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้เกิดปัญหาขยะเพิ่มมากขึ้น ในระยะแรกการฝังกลบเป็นวิธีที่นิยมกันมา แต่ปัจจุบันพื้นที่สำหรับฝังกลบหายากขึ้น และบ่อฝังกลบยังก่อให้เกิดมลภาวะตามมา น้ำเสียจากกองขยะ ทำให้น้ำบนดินและน้ำบาดาลไม่สามารถนำมาบริโภคได้ อีกทั้งกลิ่นเหม็นจากกองขยะก็รบกวนความเป็นอยู่ของชาวบ้าน

จากปัญหาการฝังกลบขยะทำได้ยากขึ้น การกำจัดโดยการเผา เป็นวิธีที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้อีกต่อไป การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และเป็นประโยชน์จากขยะมากที่สุด น่าจะเป็นทางเลือกที่นำมาใช้

พลังงานชีวมวล

เชื้อเพลิงที่ได้จากสิ่งมีชีวิตเช่น ไม้ฟืน แกลบ กากอ้อย เศษไม้ เศษหญ้า เศษเหลือทิ้งจากการเกษตร เหล่านี้ใช้เผาให้ความร้อนได้ เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพแบบของแข็ง และความร้อนนี้แหละที่เอาไปปั่นไฟ โดยเหตุที่ประเทศไทยทำการเกษตรอย่างกว้างขวาง วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบ ขี้เลื่อย ชานอ้อย กากมะพร้าว ซึ่งมีอยู่จำนวนมาก (เทียบได้น้ำมันดิบปีละไม่น้อยกว่า 6,500 ล้านลิตร) ก็ควรจะใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ได้

ในกรณีของโรงเลื่อย โรงสี โรงน้ำตาลขนาดใหญ่ อาจจะยินยอมให้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าต่างๆในประเทศ ในลักษณะของการผลิตร่วม (Co-generation) ซึ่งมีใช้อยู่แล้วหลายแห่งในต่างประเทศโดยวิธีดังกล่าวแล้วจะช่วยให้สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานในประเทศสำหรับส่วนรวมได้มากยิ่งขึ้นทั้งนี้อาจจะรวมถึงการใช้ไม้ฟืนจากโครงการปลูกไม้โตเร็วในพื้นที่นับล้านไร่ ในกรณีที่รัฐบาลจำเป็นต้องลดปริมาณการปลูกมันสำปะหลัง อ้อย เพื่อแก้ปัญหาระยะยาวทางด้านการตลาดของพืชทั้งสองชนิด อนึ่ง สำหรับผลิตผลจากชีวมวลในลักษณะอื่นที่ยังใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น แอลกอฮอล์ จากมันสำปะหลัง ก๊าซจากฟืน (Wood gas) ก๊าซจากการหมักเศษวัสดุเหลือจากการเกษตร และขยะชุมชน หากมีความคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ก็อาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าได้เช่นกัน

2.3 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) [2] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือกชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายเศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือ ไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสดกากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลังซังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออกกาบและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปลอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อ มะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าวส่าเหล้า ได้จากการผลิตอัลกอฮอล์เป็นต้นชีวมวล สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แล้วเปลี่ยนพลังงาน จากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการ สังเคราะห์แสงได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้น เมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง เราก็จะได้พลังงานออกมา การใช้ประโยชน์ จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ ทั้งในรูปของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก หากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก เพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง ชีวมวล มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม เรายังมุ่งหวังว่าการพัฒนาโครงการเกี่ยวกับชีวมวลจะสามารถเสริมสร้างความเข้มแข็งและการมีส่วนร่วมของชุมชนได้อีกด้วย

2.3.1 ศักยภาพชีวมวล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลผลิตและการใช้ชีวมวล [8] พบว่า ชีวมวลบางประเภทที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง และมีปริมาณคงเหลือไม่มาก หรือบางชนิดขาดแคลน อาทิเช่น แกลบ กากอ้อย ซึ่งชีวมวลเหล่านี้เป็นประเภทที่เกิดขึ้นที่โรงงานอุตสาหกรรม ผู้ประกอบการได้หาแนวทางในการใช้กำจัดและลดต้นทุนในการผลิตของตน ด้วยการใช้แทนเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ จนปัจจุบันเชื้อเพลิงเหล่านี้มีการซื้อ – ขาย และมีกลไกด้านการตลาดจนครบวงจรแล้วหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นชีวมวลประเภทที่เป็น เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ ส่วนชีวมวลอีกหลายประเภทพบว่ามีปริมาณคงเหลืออยู่เป็นจานวนมาก เนื่องจากมีการใช้อยู่ในวงจำกัด หรือบางประเภทยังไม่ได้มีการนำไปใช้อย่างเป็นรูปธรรม อาทิยอดและใบอ้อย ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง ทะลายปาล์มเปล่า ทางใบและก้านปาล์มเป็นต้น

ชีวมวลจากข้าว

แกลบ จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของสานักงานเศรษฐกิจการเกษตร ในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวทั้งประเทศเท่ากับ 28.61 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณแกลบเท่ากับ 3.95 ล้านตัน โดยมีการนำแกลบเหล่านี้มาใช้งาน คิดเป็นปริมาณรวม 0.86 ล้านตัน หากนำปริมาณแกลบคงเหลือดังกล่าวมาหักด้วยปริมาณการสูญเสียของแกลบ ที่เกิดจากการขัดสี และการฟุ้งกระจายทั้งในระหว่างกระบวนการต่างๆ และการขนส่ง ดังนั้นปริมาณแกลบคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.09 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 843 Ktoe มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 320 MW

ฟางข้าว จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปีเพาะปลูก 2549 – 2550สามารถประเมินปริมาณฟางข้าว เท่ากับ 34.04 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดปริมาณที่เก็บรวบรวมได้ (ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม 10%) ปริมาณฟางข้าวคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.40 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 926.10 Ktoe คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 352 MW

ชีวมวลจากข้าวโพด

ซังข้าวโพด จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตร ในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณซังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่างๆ คิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทาให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 Ktoe คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 MW

ชีวมวลจากอ้อย

ยอดและใบอ้อย จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตอ้อยทั้งประเทศเท่ากับ 70 ล้านตัน คิดเป็นชีวมวลประเภท ยอดและใบอ้อย เท่ากับ 16.8 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40 %) จะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 6.72 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 1,935.7 Ktoe คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 735 MW

กากอ้อย จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 สามารถประเมินปริมาณของกากอ้อย เท่ากับ 21 ล้านตัน ชีวมวลประเภทนี้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันได้ถูกแปรไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนในโรงงานผลิตน้ำตาล และบางโรงงานนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จึงทาให้ชีวมวลประเภทนี้หมดไปกับการใช้ในโรงงานเป็นหลัก แม้แต่มีความต้องการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นๆแต่ก็ไม่มีวัตถุดิบมาป้อน รวมทั้งโรงงานผลิตน้ำตาลหรือโรงผลิตไฟฟ้าจากกากอ้อยหลายโรงได้เริ่มเสาะหาเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆมาใช้ร่วมกับกากอ้อยเนื่องจากภาวะขาดแคลนของกากอ้อย

ชีวมวลจากมันสาปะหลัง

ลำต้นมันสำปะหลัง จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของกรมส่งเสริมการเกษตรปี 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศเท่ากับ 17.6 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณลำต้นมันสำปะหลัง 2.11 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.84 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 198 Ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 75 MW

เหง้ามันสำปะหลัง จากข้อมูลผลผลิตเหง้ามันสาปะหลัง สามารถประเมินปริมาณเหง้ามันได้เท่ากับ 1.76 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.7 ล้านตัน และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 131 Ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 50 MW ในปัจจุบันแทบไม่มีการนำเอาเหง้ามันสำปะหลังมาใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากการเก็บรวบรวมมีความยากลำบาก และต้นทุนการขนส่งสูง

ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน

ทางใบและก้านปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตของกรมส่งเสริมการเกษตรในปีเพาะปลูก 2549 – 2550 มีปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันทั้งประเทศเท่ากับ 8.75 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณทางใบ และก้านเท่ากับ 2.36 ล้านตัน เมื่อคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (65%) และการนำไปใช้ประโยชน์จะมีปริมาณชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.54 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 481 Ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 183 MW

กากใยปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมัน มีปริมาณของกากใยปาล์มที่ได้ เท่ากับ 1.31 ล้านตัน โดยชีวมวลประเภทนี้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อหักปริมาณที่ถูกใช้งานออกจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.23 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 81.3 Ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 31 MW

กะลาปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมัน สามารถประเมินปริมาณกะลาปาล์มได้เท่ากับ 0.53 ล้านตัน โดยมีการใช้ชีวมวลประเภทนี้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นเชื้อเพลิง คิดเป็นปริมาณรวม 18,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆ 147,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.31 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 114 Ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 43 MW

ทะลายปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมัน สามารถประเมินปริมาณของทะลายปาล์มได้เท่ากับ 2.01 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้ในการผลิตไฟฟ้า คิดเป็นปริมาณรวม 80,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆ เช่น ทำปุ๋ยและเพาะเห็ด คิดเป็นปริมาณ 160,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.13 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 385 Ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 146 MW

ชีวมวลจากไม้ยางพารา

ขี้เลื่อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพารา ทาให้ทราบว่าในแต่ละปีต้นยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัดฟัน คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดฟัน 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิต คิดเป็นเศษไม้ 3.6 ล้านตัน และขี้เลื่อย 8 ล้านตัน เมื่อหักปริมาณที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ จะมีเศษไม้คงเหลือ 3.55 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 1,862 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 707 MW ในส่วนของขี้เลื่อยจะมีปริมาณคงเหลือ 1,037 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 394 MW

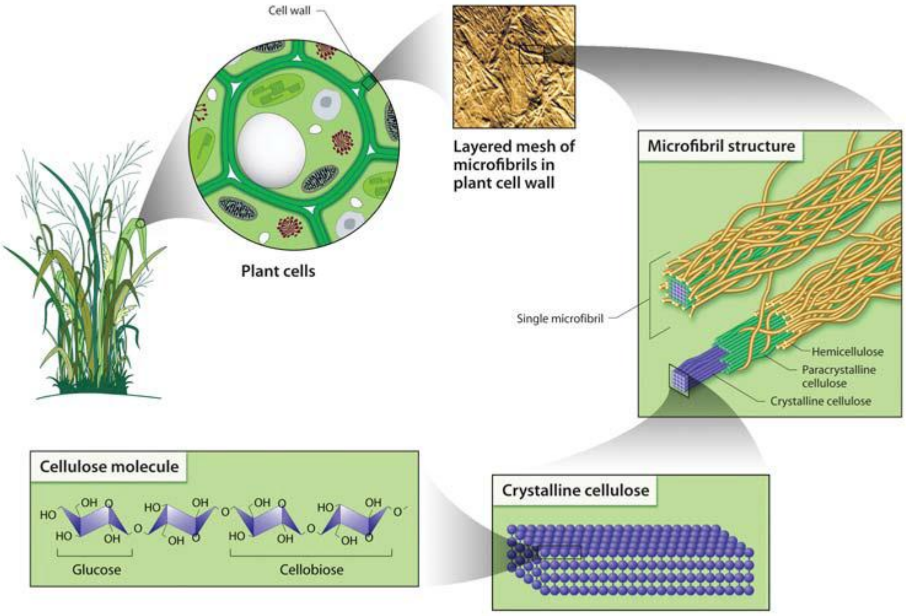
ชีวมวลที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส

ไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่ โดยผลผลิตของไม้ยูคาลิปตัสทั้งประเทศ มีปริมาณรวม 6.8 ล้านตันต่อปี มีชีวมวลเกิดขึ้น คือ ไม้ฟืนและเปลือกไม้ โดยไม้ฟืนจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า สาหรับเปลือกไม้จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน แต่ยังมีปริมาณการใช้งานน้อย เมื่อประเมินจำนวนของชีวมวลคงเหลือ พบว่าจะมีไม้ฟืนคงเหลือเท่ากับ 0.57 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 167 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 63.5 MW สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณคงเหลือ 0.61 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 186 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 70.5 MW

2.4 องค์ประกอบของชีวมวล

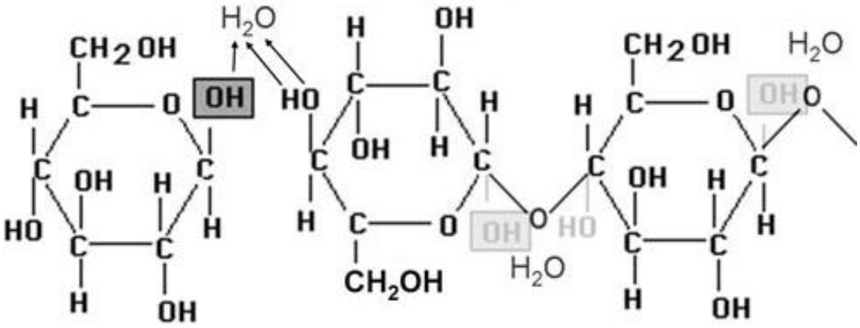
2.4.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส [9] เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุดประมาณ 45% ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในธรรมชาติ ส่วนใหญ่สะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ในพืชชั้นสูงทุกชนิด ซึ่งมีส่วนประกอบของเซลลูโลสมากกว่า 97-99% จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ ประกอบด้วย polymer chain เรียงขนานกัน และยึดกันด้วย dispersion force และhydrogen bond ภายในโมเลกุลเซลลูโลสจึงยึดติดกันแน่น ทำให้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้ช้า เซลลูโลสใน primary cell wall ประกอบด้วยกลูโคสยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล และ ไม่ต่ำกว่า 14,000 โมเลกุลใน secondary cell wall โดยโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (micro fibril) เพื่อให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช

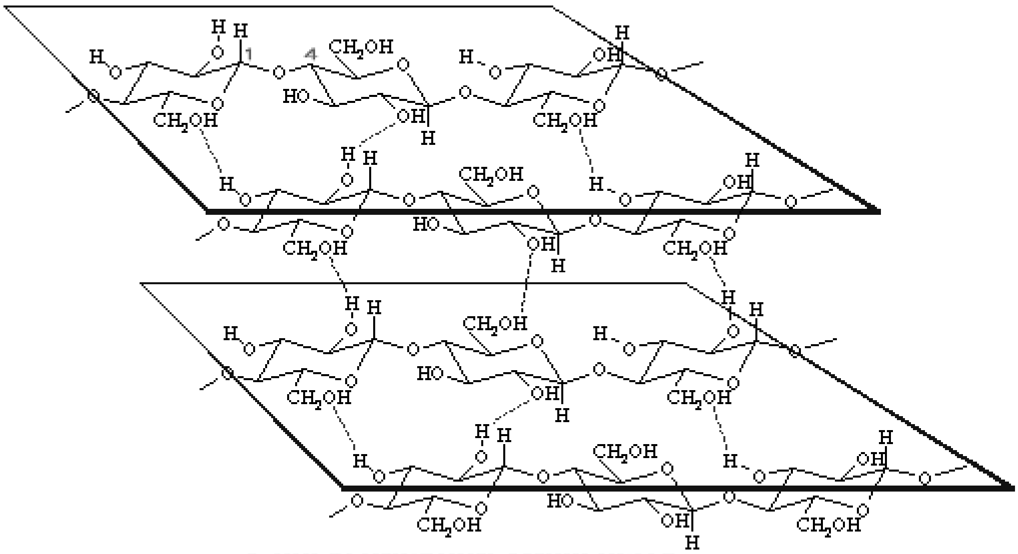


ภาพ 2.4 โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง [9]

ในด้านโครงสร้างทางเคมี เซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคส (glucose) จำนวน 1,000-10,000 โมเลกุล ต่อกันเป็นโพลีเมอร์ (polymer) เชื่อมกันด้วย β -1, 4-glycosidic bond ระหว่าง alcoholic hydroxyl groups โดยโมเลกุลสายยาวของเซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคส 2,000-15,000 โมเลกุล และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ20,000-2,400,000 ดาลตัน (Dalton) การเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีแขนงย่อยมีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C6H10O5)n$ เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง



ภาพ 2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส [9]

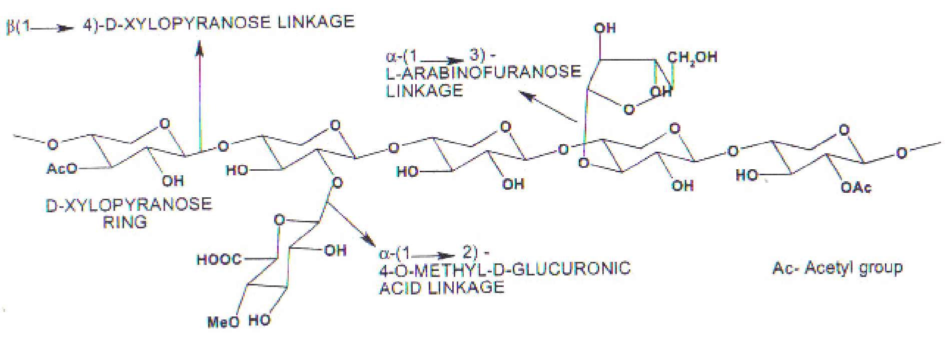


ภาพ 2.6 ลักษณะการสานกันเป็นร่างแหของเซลลูโลส [9]

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส [9] เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 โดยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลสหลายชนิดกล่าวคือมีไซโลสมากที่สุดถึง 85-90% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม กรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกาแลกตูโรนิก (galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจางหรือเอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย พืชประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่รวมกับเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์พืชที่

แข็งแรง เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลส และอะราบิโนส และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส แมนโนส และกาแลกโตสองค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา (1,4) และพบในไม้เนื้อแข็งมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่รวมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ และมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนท์ โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมธิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl-α-D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกโดยง่ายด้วยสารละลายเบสแต่ขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้นอาจต้องมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ร่วมด้วย

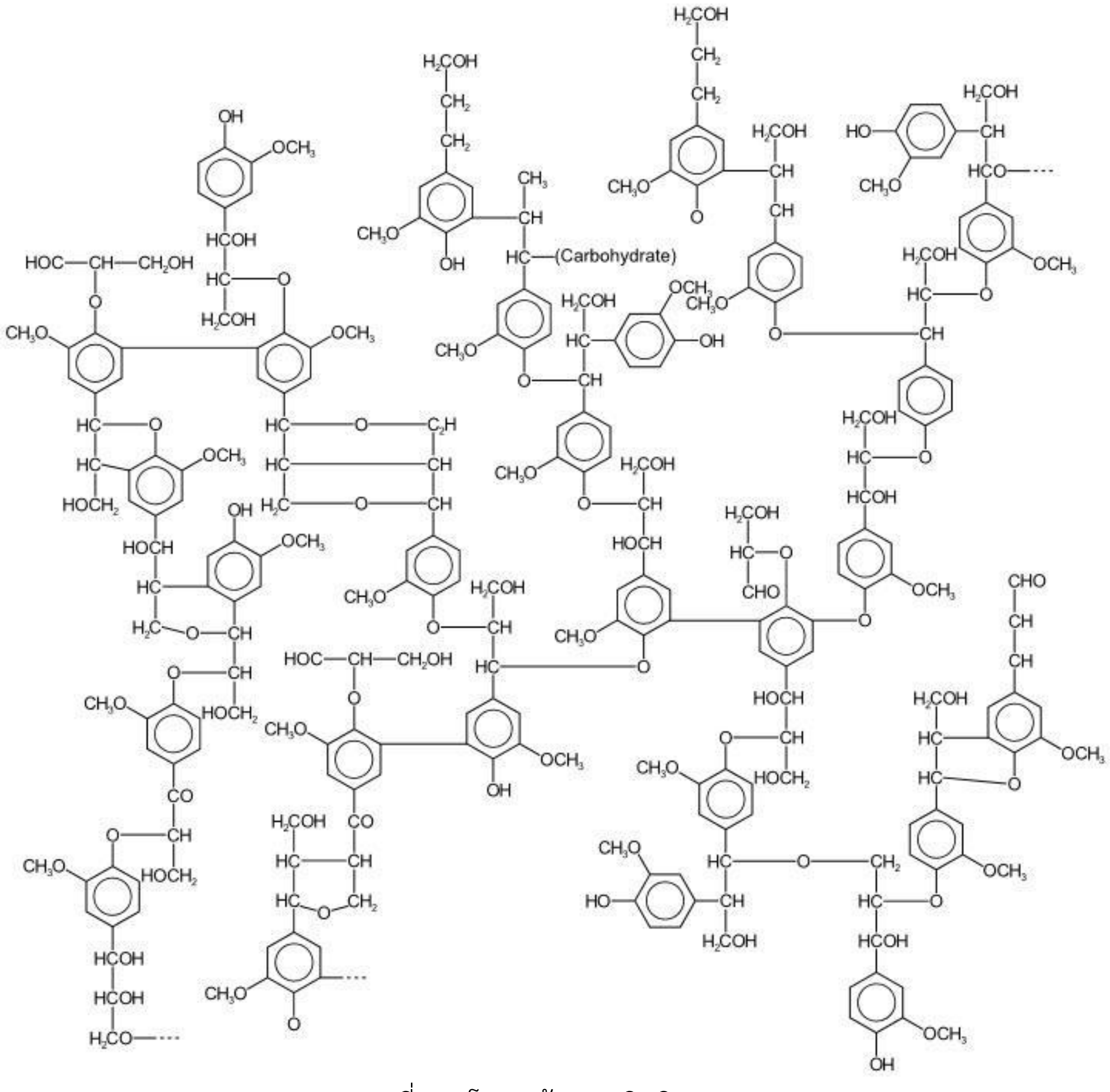


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [9]

2.4.3 ลิกนิน

ลิกนิน [10] เป็นสารโพลิเมอร์ขนาดน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10 ถึง 1,000 ดาลตันหรือมากกว่าที่สังเคราะห์ขึ้นจากหน่วย phenylpropanoid 3 ชนิด คือ coniferyl alcohol, sinapyl alcohol และ ρ-coumatyl alcohol หน่วยย่อยทั้งสามชนิดมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ดังใน gymnosperm (soft wood) จะพบconiferyl alcohol เป็นส่วนใหญ่และพบบางส่วนเป็น ρ-coumatyl alcohol ส่วน angiosperm (hard wood) พบว่ามี coniferyl alcohol และ sinapylalcohol ในปริมาณใกล้เคียงกันพบ ρ-coumatyl alcohol เพียงเล็กน้อย (Bisaria and Chose,1981) หน่วยย่อยเหล่านี้จะจับตัวกันเป็นโครงสร้างสามมิติโดยสร้างพันธะอีเทอร์ (ether) ระหว่างตำแหน่งที่สี่ของวงแหวนฟีนอล (phenol) กับคาร์บอนตำแหน่ง β ของ side chain ซึ่ง side 4 chain ของลิกนินประกอบด้วย cinnamyl alcohol, aldehyde และ hydroxylated side chain ลิกนินเป็นโมเลกุล racemic cross – linked กับกลุ่มโมเลกุลในส่วนที่เกิน 10,000 หน่วย จะค่อนข้างชอบน้ำและมีกลิ่นหอมในธรรมชาติ ปฏิกิริยาการเกิดลิกนิน (polymerization) ในธรรมชาติ

เป็นสิ่งที่ยากในการวัดเนื่องจากลิกนินอยู่อย่างกระจัดกระจาย และโมเลกุลประกอบด้วยโครงสร้างย่อย (substructures) ที่ซ้ำ ๆ กัน



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของลิกนิน [10]

2.5 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวล [11] หรือสสารทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

2.5.1 ความชื้น (Moisture)

ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวลซึ่งโดยปกติของชีวมวลนั้นความชื้นจะอยู่ที่ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักยกเว้นพวกมันสัมปะหลังเพราะมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 70-80 โดยน้ำหนัก

2.5.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

ส่วนที่เผาไหม้ได้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles Matter) และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ง่าย สลายตัว เมื่อได้รับความร้อนซึ่งสารระเหยคือส่วนที่ระเหยได้ง่ายเมื่อเจอความร้อนและคาร์บอนคงตัวคือปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่

2.5.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือขี้เถ้า (Ash)

เมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้ว จะมีเนื้อสารบางส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งคือขี้เถ้า โดยชีวมวลแต่ละประเภทจะมีสัดส่วนของปริมาณขี้เถ้าในชีวมวลแตกต่างกันซึ่งในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสจะมีเถ้าปริมาณน้อยอยู่ที่ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก แต่โดยทั่วไปชีวมวลจะมีเถ้าอยู่ที่ร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนัก

2.6 พลังงานที่ได้จากชีวมวล

พลังงานที่ได้จากชีวมวล [11] แต่ละประเภทจะให้พลังงานจากการเผาไหม้แตกต่างกัน ตามลักษณะองค์ประกอบต่างๆ ของชีวมวลแต่ละชนิด และสัดส่วนความชื้นที่สะสมอยู่ในชีวมวล โดยค่าความร้อนหรือพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลจะแสดงได้เป็น

ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) เป็นค่าพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้จริงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งได้หักพลังงานส่วนหนึ่งที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวลออกไประหว่างการเผาไหม้ โดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็น กิโลจูล (kJ) ต่อกิโลกรัมชีวมวล (kg) หรือ กิโลแคลอรี (kcal) ต่อกิโลกรัมชีวมวล (kg)

ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) เป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลมีหน่วยเป็น kJ/kg หรือ kcal/kg จากการสำรวจคุณลักษณะของชีวมวลประเภทต่างๆ จะได้คุณสมบัติเบื้องต้น และค่าพลังงานความร้อนที่ได้จาก ชีวมวลแต่ละประเภทดังนี้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของชีวมวลแต่ละชนิด [8]

คุณสมบัติชีวมวล	ความชื้น (%wt.)	ขี้เถ้า (%wt.)	สารระเหย (%wt.)	คาร์บอนคงตัว (%wt.)	HHV (KJ/Kg)
แกลบ (Rice Husk)	12	12.65	56.46	18.88	14,755
ฟางข้าว (Rice Straw)	10	10.39	60.7	18.9	13,650
ชานอ้อย (Bagasse)	50.73	1.43	41.98	5.86	9,243
ใบอ้อย (Cane Trash)	9.2	6.1	67.8	16.9	16,794
ไม้ยางพารา (Para wood)	45	1.59	45.7	7.71	10,365
เส้นใยปาล์ม	38.5	4.42	42.68	14.39	13,127
กะลาปาล์ม	12	3.5	68.2	16.3	18,267
ทะลายปาล์ม	58.6	2.03	30.46	8.9	9,196
ต้นปาล์ม	48.4	1.2	38.7	11.7	9,370
ทางปาล์ม	78.4	0.7	16.3	4.6	3,908
ซังข้าวโพด (Corncob)	40	0.9	45.42	13.68	11,298
ลำต้นข้าวโพด	41.7	3.7	46.46	8.14	11,704
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	60	2.44	28	9.56	6,811

2.7 ข้อดีข้อเสียของพลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวล ประมาณร้อยละ 15 พลังงานของโลก เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์ และพืชที่สามารถให้พลังงานบางชนิด ในประเทศอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้ได้นำมาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำใช้ในอุตสาหกรรม ในขณะที่ประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนการหุงต้ม

สรุปข้อดีการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. ในกระบวนการเผาไหม้หรือให้ความร้อนของน้ำมันเตาและถ่านหินก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โลกร้อนขึ้น แต่ในส่วนชีวมวลนั้นใช้แก๊สแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสงและเจริญเติบโตจึงถือได้ว่าการเผาชีวมวลไม่ก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจกเพราะชีวมวลสามารถนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ได้

2. การย่อยสลายเศษซากอาหารหรือชีวมวลตามธรรมชาติ จะทำให้เกิดแก๊สมีเทน การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์จึงเป็นการลดปล่อยแก๊สมีเทน

3. ชีวมวลจะมีส่วนประกอบของกำมะถันไม่เกินร้อยละ 0.1 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด เพราะจะไม่เกิดการปลดปล่อย SO_x ขณะที่น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันสูงถึงประมาณร้อยละ 2 และถ่านหินจะมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3-4.0 ซึ่งขึ้นกับประเภทของถ่านหินทำให้เมื่อเกิดการเผาไหม้ทำให้เกิดแก๊ส SO_x เป็นสาเหตุของฝนกรด

4. ขี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นเบส ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำไปเพาะปลูก หรือใช้ในการปรับสภาพดินที่เป็นกรด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

5. ลดการนำเข้าจากต่างประเทศช่วยลดค่าใช้จ่ายหรือเงินตราที่ออกจากต่างประเทศ

6. สามารถแปรรูปชีวมวลเป็นปุ๋ย โดยผ่านกระบวนการหมัก

7. เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การนำเศษไม้โรงเลื่อยมาย่อยและอัดเป็นแผ่นปาร์ติเคิลบอร์ด และ แปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

สรุปข้อจำกัดการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

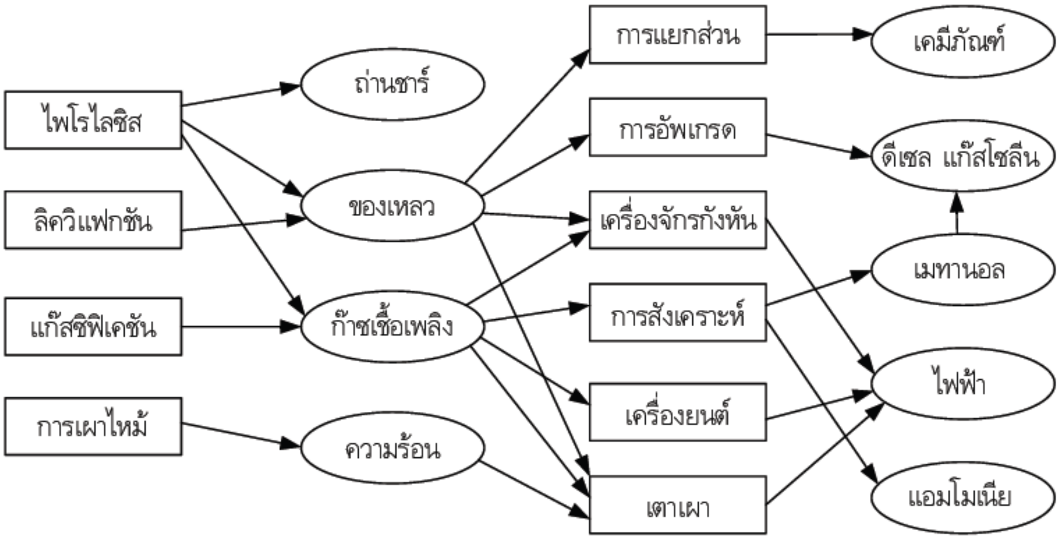
1. ชีวมวลมีน้ำหนักที่แตกต่างกันไปตามชนิดของชีวมวลและส่วนใหญ่จะมีน้ำหนักที่เบาและมีขนาดที่เล็กยากต่อการขนส่ง และควบคุมการแพร่กระจายในอากาศ

2. ชีวมวลมีความชื้นสูง การออกแบบหม้อผลิตไอน้ำและปล่องไอเสียต้องมีขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นเพิ่ม ทำให้เกิดการลงทุนมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าชีวมวลมีความชื้นสูง ทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนที่ต่ำอาจทำให้หม้อผลิตไอน้ำมีประสิทธิภาพต่ำ

3. ชีวมวลส่วนใหญ่มีส่วนผสมของธาตุโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งจะส่งผลต่อกัดกร่อน

2.6 การแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานเชื้อเพลิง

ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้า โดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงระดับโรงไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานด้วยกระบวนการทางเคมี-ความร้อน มีระบบหลักๆอยู่ 4 ระบบ คือ 1.การเผาไหม้โดยตรง (Direct-Fired) 2.การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงสองชนิดขึ้นไป (Co-Firing) 3.การผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification) 4.ไพโรไลซิส (Pyrolysis) และ 5.ลิควิคแฟคชั่น (Liquid faction) ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ต้องการและภาวะในกระบวนการที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.9 กระบวนการแปรรูปทางความร้อนของชีวมวล [3]

2.7.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนร่วมการเกิดความร้อนสูงและแสง เป็นปรากฏการณ์ที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา เมื่อใช้สารชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่มีความร้อนเกิดขึ้นโดยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ที่เผาไหม้ได้ และไนโตรเจนซึ่งอยู่ในสารชีวมวลทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเรียกว่าการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาในเฟสแก็ส ปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิว หรือทั้งคู่ตามด้วยกระบวนการหลอมเหลว การระเหยและไพโรไลซิส ในปฏิกิริยาการเผาไหม้จริงเกิดปรากฏการณ์หลายอย่างที่ซับซ้อนเช่น การระเหย การแพร่ การผสม การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสี และการเกิดเปลวไฟที่อุณหภูมิสูง เชื้อเพลิงเผาโดยตรงในเฟสก๊าซในการการเผาไหม้ เป็นแบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน

(Premix combustion) และการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงแพร่กระจาย (Diffuse combustion) เชื้อเพลิงของเหลวจุดเผาเหมือนเป็นก๊าซเผาไหม้ได้ในเฟสก๊าซหลังจากการระเหยที่พื้นผิวซึ่งเรียกว่าการเผาแบบระเหย น้ำมันจะถูกเผาในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) แต่การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว(Decomposition combustion) ยังดำเนินต่อไปซึ่งจะสลายเชื้อเพลิงบางส่วนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา

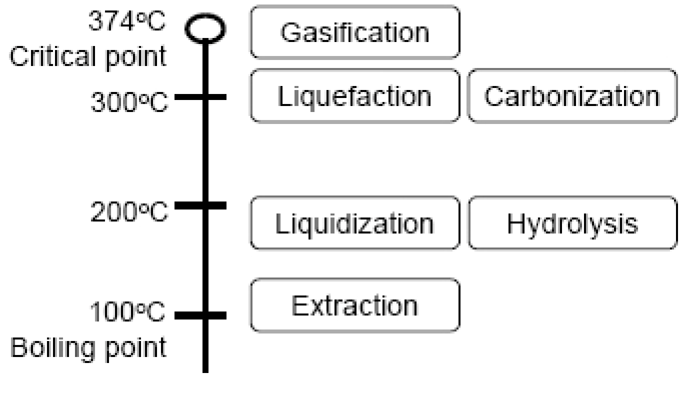
รูปแบบการเผาไหม้ของการเผาไหม้สารชีวมวลโดยตรงซึ่งเป็นของแข็งนั้นได้แก่ การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (Decomposition combustion) การเผาไหม้ที่พื้นผิว (Surface combustion) การเผาไหม้แบบช้าๆที่ไม่มีไฟแต่มีควัน (Smoldering combustion) ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหยนั้นเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยสารประกอบพื้นฐานซึ่งโครงสร้างโมเลกุลจะมีจุดหลอมเหลวต่ำและระเหยได้โดยการให้ความร้อน และทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเฟสก๊าซและเกิดการเผาไหม้ ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการ สลายตัวโดยการให้ความร้อน (H_2 CO C_mH_n H_2O และ CO_2) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเฟสก๊าซ และเกิดเปลวไฟและเกิดการเผาไหม้ โดยปกติชาร์นั้นจะเหลือหลังจากการเผาไหม้ชนิดนี้และถูกเผาด้วยการเผาไหม้ที่พื้นผิว การเผาไหม้ที่พื้นผิวเกิดในกรณีของสารองค์ประกอบประกอบด้วยคาร์บอนที่มีสารระเหยได้สะสมอยู่เล็กน้อยเท่านั้น เช่น ถ่านหิน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำจะแพร่เข้าไปในรูปที่มีอยู่ในหรือพื้นผิวของของแข็งของสารนั้นและเกิดเผาไหม้โดยปฏิกิริยาที่พื้นผิว การเผาไหม้ช้าๆแบบไม่มีไฟแต่มีควันนั้นเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ จุดไฟติดของสารระเหยของเชื้อเพลิงที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้นั้นเช่น ไม้ ถ้าการติดไฟทำให้เกิดควันหรืออุณหภูมินั้นเกินกว่าจุดติดไฟการเผาไหม้การเผาไหม้ที่มีไฟจะเกิดขึ้น รูปแบบการเผาไหม้หลักในการเผาไหม้ของสารชีมวลโดยตรงในอุตสาหกรรมนั้น ได้แก่ การเผาแบบเชื้อเพลิงสลายตัวและการเผาไหม้ที่พื้นผิว

วิธีของการเผาไหม้ ในอุตสาหกรรมการเผาไหม้ อากาศส่วนเกินถูกเติมเข้าไปในปริมาณหนึ่งเพิ่มจากปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ต้อง ใช้ในการเผาไหม้ของสารชีวมวล ถ้าอัตราการเติมอากาศส่วนเกินสูงเกินไปจะทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ลดต่ำลงและ ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดต่ำลงด้วย ดังนั้นวิธีในการเผาสารชีวมวลถูกนำมาใช้ ได้แก่ การเผาไหม้แบบตะกรับ (แบบนิ่งและแบบเคลื่อนไหว) (Fixed grate, moving grate) การเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed combustion) การเผาไหม้แบบเตาฮาร์ทแบบหมุน (Rotary hearth furnace combustion) การเผาไหม้แบบเตาเผา (Burner combustion)

2.7.2 ลิควิแฟกชั่น

ลิควิแฟคชั่นคือการไพโรไลซิสในน้ำที่มีความดันสูงประมาณ 10 เมกกะปาสคาลและอุณหภูมิสูงประมาณ 300 องศาเซลเซียส สารชีวมวลจะถูกเปลี่ยนก๊าซ ของเหลวและของแข็งซึ่งคล้ายกับไพโรไลซิสในเฟสก๊าซ ทาร์ที่มี
น้ำหนักเบา เช่น ไพโรลิกเนียสนั้นจะละลายน้ำได้ ทาร์ที่มีน้ำหนักมากจะได้จากการผสมกับกับชาร์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงได้แก่ ก๊าซ สารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ และสารจำพวกน้ำมัน

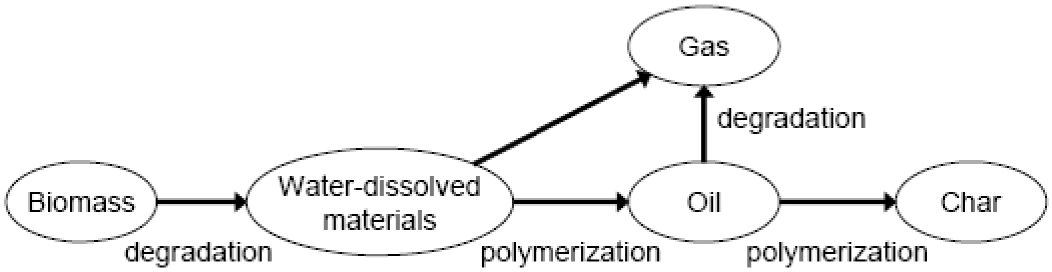
ลิควิแฟคชั่นนั้นทำปฏิกิริยาในน้ำ วัตถุดิบตั้งต้นไม่ต้องผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับสารชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูงเช่น สารชีวมวลน้ำ ขยะ กากอินทรีย์และอื่นๆ นอกจากนั้นปฏิกิริยาหลายชนิดสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่แตกต่างแสดงดังรูป 2.9 แสดงปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นในน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูง ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียสสารที่ละลายได้จะละลายในน้ำและเหมาะกับการการสกัดสาร เมื่อสูงกว่าอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเกิดการไฮโดรไลซิสและสารชีวมวลจำพวก เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โปรตีนและอื่นๆจะถูกย่อยจากโพลีเมอร์เป็นโมโนเมอร์ และที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสและความดัน 1 เมกกะปาสคาล ของแข็งจำพวกสารชีวมวลจะถูกเป็น slurry (การทำให้เป็นของเหลว) และสารจำพวกน้ำมันยังไม่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียสและความดัน 10 เมกกะปาสคาลลิควิแฟคชั่นจะเกิดขึ้นและจะได้สารจำพวกน้ำมัน เมื่อเงื่อนไขของปฏิกิริยาเปลี่ยนเช่น เวลาในการทำปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์หลักจะถูกชาร์ (ไฮโดรเทอร์มัล คาร์บอนไนเซชั่น) และที่จุดวิกฤตร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา สารชีวมวลสามารถเปลี่ยนก๊าซ



รูปที่ 2.9 ปฏิกิกริยาที่เกิดในน้ำความดันและอุณหภูมิ

ลิควิแฟคชั่นเป็นการไพโรไลซิสดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชั่นแผนผังปฏิกิริยาพื้นฐานแสดงในรูป 2.10 ในขั้นตอนแรกสารชีวมวลจะถูกสลายเป็นสารที่ละลาย

น้ำ จากนั้นสารที่ละลายน้ำจะเกิดการโพลิเมอร์ไรเซชั่นเปลี่ยนเป็นน้ำมัน เมื่อเกิดปฏิกิริยานานขึ้น น้ำมันที่เกิดขึ้นจะเกิดการโพลิเมอร์ไรเซชั่นเปลี่ยนเป็นชาร์



รูปที่ 2.10 แผนผังปฏิกิริยาลิควิแฟคชั่นเบื้องต้น

2.7.3 แก๊สซิฟิเคชั่น

กระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) [12] เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (แก๊สเชื้อเพลิง) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C ผ่านตัวกลางของกระบวนการเช่น อากาศ ออกซิเจนที่มีจำนวนจำกัด หรือไอน้ำ ซึ่งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นจะมีความแตกต่างจากกระบวนการเผาไหม้อย่างสิ้นเชิงโดยการเผาไหม้เป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นอย่างสมบูรณ์ในหนึ่งกระบวนการเท่านั้น แต่สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีภายในของคาร์บอนในชีวมวลไปเป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Gas) โดยอาศัยปฏิกิริยา 2 กระบวนการ โดยแก๊สที่ผลิตได้จะมีคุณภาพที่ดีกว่าและง่ายต่อการใช้งานกว่าชีวมวล ยกตัวอย่างเช่น สามารถใช้เดินเครื่องยนต์แก๊ส และกังหันแก๊ส (Gas Turbine) หรือใช้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวต่อไป อีกนัยหนึ่ง กระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปทางด้านเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion Process) โดยอาศัยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

สามารถสรุปเป็นปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ปฏิกิริยาการเผาไหม้

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 \qquad (2.1)$$

$$C + 1/2O_2 \longrightarrow CO \qquad (2.2)$$

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O \qquad (2.3)$$

ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาคลายความร้อน ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนในบริเวณอื่นภายในเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิในการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 1100-1500 องศาเซลเซียส

2. ปกิกิริยาบูดูอาร์ด (Boudouard reaction)

$$C + CO_2 \longrightarrow 2CO \qquad (2.4)$$

3. ปฏิกิริยาแก๊สน้ำ (Water Gas Reaction)

$$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2 \qquad (2.5)$$

ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยารีดักชั่น ซึ่งจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 500 – 900 องศาเซลเซียสในโซนนี้แก๊สบางส่วนจะทำปฏิกิริยากันถ่านชาร์ที่ร้อนเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์มากขึ้น

4. ปฏิกิริยาชิฟต์ (water gas shift reaction)

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2 \qquad (2.6)$$

ถ้าในกระบวนการมีไอน้ำมากเกินไป อาจจะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนตามปฏิกิริยา water gas shift reaction

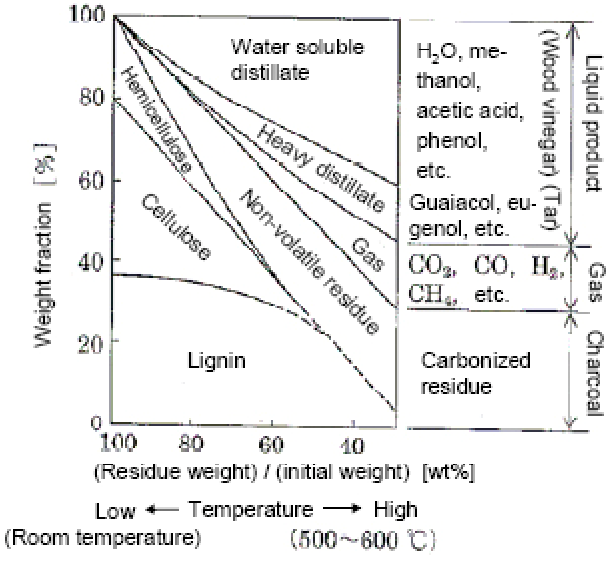
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8 ไพโรไลซิส

ไพโรไลซิสชีวมวล [13] ซึ่งสารชีวมวลประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นหลัก กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและไพโรไลซิส สามารถอธิบายได้โดยง่ายตามสูตรต่อไปนี้ องค์ประกอบหลักทางเคมีของสารชีวมวลได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.11 เปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบระหว่างเกดปฏิกิริยาไพโรไลซิส เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินนั้น จะถูกย่อยสลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเศษของแข็งที่เหลือคือชาร์ซึ่งมีผลิตผลเท่า 10-25% แสดงดังปฏิกิริยา

Biomass heat ⟶ Char + Pyrolytic oil (high and moderate molecule weight organic liquid + other condensable in oxygenate organic + CO_2 + CO + H_2 + CH_4 + H_2O + other (2.7)

Organic liquid heat Aromatic organic + low molecule weight organic liquid + Cha r+ CO_2 + CO + H_2 + CH_4 + H_2O + other (2.8)



รูป 2.11 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส [13]

ในระหว่างปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [14] ความชื้นจะระเหยก่อนที่อูณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 200-260 องศาเซลเซียส ตามด้วยเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 240-340 องศาเซลเซียส และลิกนินที่อุณหภูมิ 280-500 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 500

องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุด ดังนั้นที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุดภายใน 1 นาทีขณะที่ถ้าอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุดภายใน 5 วินาที อัตราการให้ความร้อนที่สูงมีผลทำให้อัตราการเกิดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอนั้นรวดเร็วขึ้น ความดันเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลงและมีผลิตผลของของเหลวมากขึ้น ซึ่งเรียกว่าไพโรไรซิสแบบเร็วหรือ ไพโรไลซิสแบบแฟลช ไพโรไลซิสแบบเร็วจะมีผลิตผลของของเหลวสูงถึง 60-80% เมื่อไม้มีความสามารถในการนำความร้อนเท่ากับ 0.12-0.42 W/mK ซึ่งคิดเป็นประมาณ 1ใน 1000 ของค่าการนำความร้อนของทองแดง การถ่ายเทความร้อนนั้นมีความสำคัญมากในปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการนำไปบดให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กก่อน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลว ก๊าซและชาร์ที่ได้จากไพโรไลซิส ของเหลวนั้นมีความชื้นสูงจากความชื้นดั้งเดิม (8-40%) และน้ำที่เกิดขึ้น (14-17%) ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างน้ำและสารอินทรีย์ที่มีขั้ว และมีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงประมาณ 12.5-12 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อมีปริมาณความชื้นสะสมมาก ของเหลวที่ได้จะมีความหนืดต่ำและมีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำด้วย นอกจากนั้นของเหลวที่ได้นั้นไม่เสถียรจึงต้องมีการพัฒนาให้ดีขึ้นก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากและคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน C1-5 ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นก๊าซเผาไหม้ได้ ชาร์ที่ได้มีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงประมาณ 32 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และเหมาะสมเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับแอกติเวดคาร์บอน (activated carbon)อย่างไรก็ตามปริมาณชาร์ทั้งหมดถูกใช้ป็นแหล่งความร้อนของระบบไพโรไลซิส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

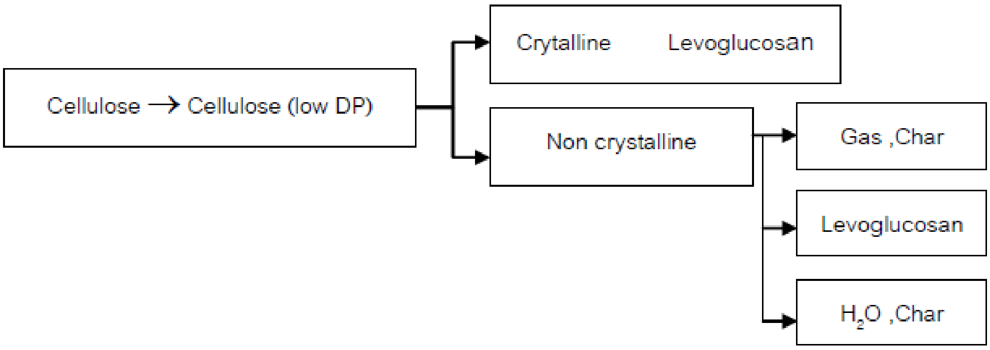
2.8.1 กลไกการไพโรไลซิส

Chulalongkorn University

องค์ประกอบของชีวมวลนั้นแตกต่างจากถ่านหินและน้ำมันเตา และการมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบทำ ให้กระบวนการไพโรไลซิสและผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างจากกลุ่มเชื้อเพลิงฟอสซิล องค์ประกอบหลักของชีวมวลคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อได้รับความร้อนจากการทำปฏิกิริยา องค์ประกอบเหล่านี้ของชีวมวลจะเกิดการแตกตัวทางความร้อนในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เข้าใจกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล จึงต้องพิจารณาพฤติกรรมของการไพโรไลซิสของแต่ละองค์ประกอบหลักต่างๆของชีวมวล

2.8.1.1 เซลลูโลส

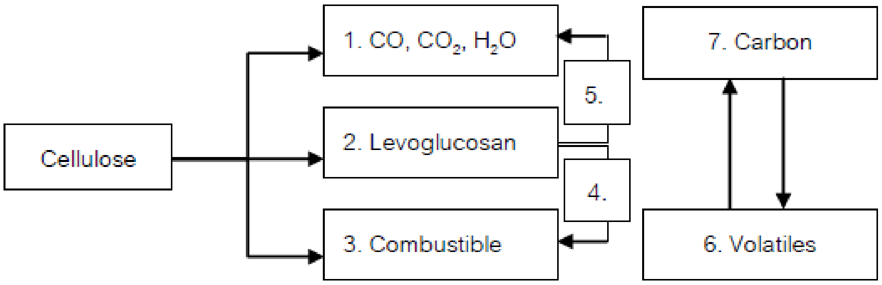
จากการศึกษาพบว่า กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นอุณหภูมิที่สำคัญ คือที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 250 องศาเซลเซียส) ในช่วงเริ่มต้นของการไพโรไลซิสจะมีการแตกพันธะไกลโคซิดิค (Glycocidic) ที่บริเวณขอบเขตระหว่างโครงสร้างรูปผลึกด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์ ทำ ให้อัตราการพอลิเมอไรเซชันลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1000 หน่วย มาคงที่ประมาณ 200 หน่วยในโครงสร้างทั้งที่เป็นรูปผลึกสายของพอลิเมอร์จะไม่จับตัวเข้าคู่กัน (Unzipping) ซึ่งในโครงสร้างรูปผลึกจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นพวกเลโวกลูโคซานส่วนในโครงสร้าง อสัณฐานจะมีการแตกของสายเซลลูโลส ที่เกิดการแยกตัวของอะตอม ไฮโดรเจนจากอะตอมของคาร์บอน ทำให้มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง สายของพอลิเมอร์ทั้งสองจะมีส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง (Active site) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (Cross link)



รูปที่ 2.12 กลไกสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ [15]

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (250-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดการแตกตัวของเซลลูโลสอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ และเกิดการสลายตัวของปฏิกิริยาดิพอลิเมอไรเซชันกับการไล่น้ำออก (Dehydration) พร้อมกัน ตามปฏิกิริยาที่ 2.9 จะเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (Intermediate) ทำ ให้เกิดการไล่น้ำออกและเกิดชาร์ขึ้นซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ 2.10 และ 2.11 ที่มีอุณหภูมิต่ำส่วนปฏิกิริยาที่ 2.10 จะมีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างพันธะไกลโคซิดิค (Tranglucosylation) ทำให้เกิดเลโวกลูโคซานขึ้นโดยกลไกที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย 2 กลไกคือ กลไกแรกจะเป็นการแตกพันธะกลูโคซิดิคแบบโฮโมไลติค (Homolytically) และเกิดการดีพอลิเมอไรเซชัน (Depolymerization) ตามกลไกของอนุมูลอิสระ (Free radical) กลไกที่สองจะมีการแตกพันธะแบบเฮเตอโรไลติค (Heterrolytically) และเกิดการดิพอลิเมอไรเซชันของผลิตภัณฑ์ขั้นกลางของ

คาร์บอเนียมอิออน (Carbonium ion) ในปฏิกิริยาที่ 2.11 เป็นการเกิดฟิชชัน (Fission) และการไม่เป็นสัดส่วนกัน (Disproportionation) ปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อปฏิกิริยาเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิ ช่วงเวลาให้ความร้อน บรรยากาศแวดล้อม (ออกซิเจน น้ำ แก๊สเฉื่อย ตัวทำปฏิกิริยาอื่นๆ) องค์ประกอบและธรรมชาติทางกายภาพของชีวมวลซึ่งปฏิกิริยาทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2.2

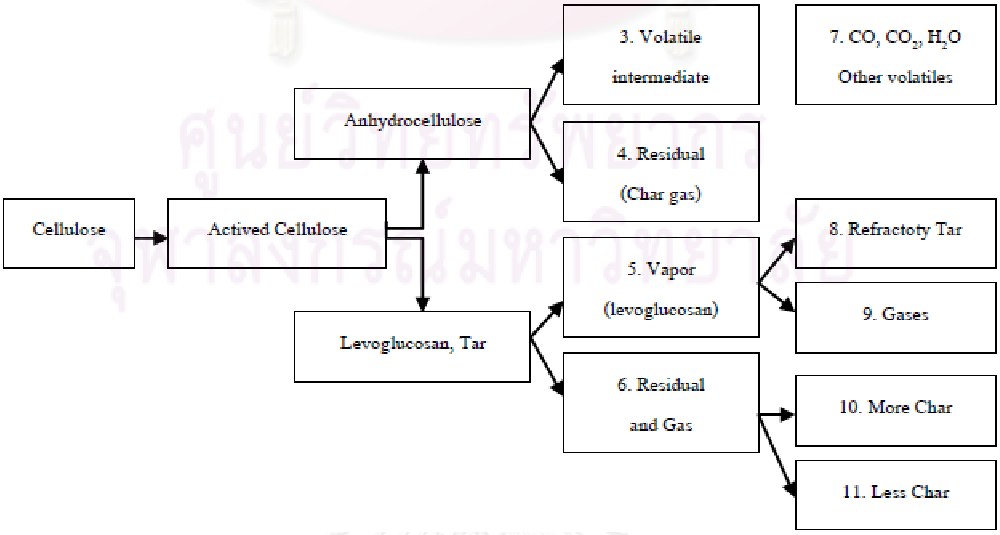


รูปที่ 2.13 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลาง [15]

ตารางที่ 2.2 ปฏิกิริยาคายความร้อนของเซลลูโลส [15]

กระบวนการ	ปฏิกิริยา	Enthalpy, kJ/kg-mole carbon convert ata	
		300 K	100K
Methanation	$CO+3H_2 \longrightarrow CH_4+H_2O$ (2.9)	-204	-227
	$CO_2+4H_2 \longrightarrow CH_4+2H_2O$(2.10)	-168	-191
Methanol formation	$CO+2H_2 \longrightarrow CH_3OH$ (2.11)	-92	-105
	$CO_2+3H_2 \longrightarrow CH_3OH+H_2O$ (2.12)	-51	-71
Char formation	$0.17C_6H_{10}O_5 \longrightarrow C+0.85H_2O$ (2.13)	-81	-80
Water gas shift	$CO+H_2O \longrightarrow CO_2+H_2$ (2.14)	-41	-34

สำหรับกลไกการเกิดการสลายตัวของโครงสร้างของชีวมวลอันได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วดังกลไกการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 2.14 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง [15]

ช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า 500 องศาเซลเซียส) กลไกการเกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงเป็นไปตามรูปที่ 2.14 เมื่อความดันสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 6 ได้ถ่านชาร์ ในขณะที่การเกิดสารระเหยได้ผ่านปฏิกิริยาที่ 3 และ 5 จะต้องใช้ความดันต่ำลง การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง

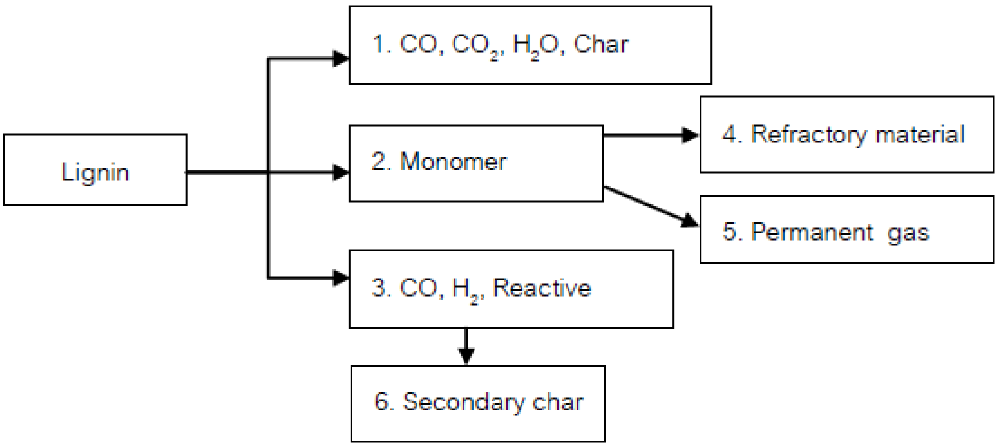
2.8.1.2 เฮมิเซลลูโลส

เมื่อเทียบกับเซลลูโลส ปฏิกิริยาไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic reaction) การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 260 องศาเซลเซียส และสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่ามาก และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีถ่านชาร์และน้ำมันชีวภาพน้อยกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะไม่แตกตัวออกเป็นกลุ่มเลโวกลูโคแซนมาก กรดแอซิติกที่ออกมาช่วงไพโรไลซิสของชีวมวลจะมีส่วนในการช่วยลดกลุ่มแอเซทิล (Deacetylation) ของเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้อแข็งจะมีไซแลนมากและกลูโคแมนแนนน้อย ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้ออ่อนจะมีไซแลนน้อยและกาแลคโตกลูโคแมนแนนมาก หากพิจารณากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าของไม้ การแตกตัวของเฮมิเซลลูโลสจะเกิดขึ้นก่อนที่อุณหภูมิ 130- 194 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เกิดที่ 180 องศาเซลเซียส

2.8.1.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างต่างๆ มาประกอบรวมกันจึงทำให้มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้หลายทางที่จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้โดยการเกิดปฏิกิริยาที่สาคัญแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งชนิดของชีวมวลและภาวะที่ใช้ในการทดลองจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก โครงสร้างของปฏิกิริยาเหล่านี้จะคล้ายกับการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลส

ช่วงอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 240 องศาเซลเซียส) จะเกิดปฏิกิริยาการไล่น้ำ ออกตามปฏิกิริยาที่ 1 แล้วเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล ทำให้ได้ถ่านชาร์และแก๊สมากขึ้นช่วงอุณหภูมิปานกลาง (240-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดลิกนินในโมโนเมอร์ขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2 โดยที่อัตราการให้ความร้อนสูงและความดันต่ำ จะทำ ให้เกิดโมโนเมอร์ของลิกนินได้ดีช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า 500 องศาเซลเซียส) แบ่งการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 2 พวกคือ โมโนเมอร์ต่างๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ 2 จะเริ่มมีการแตกตัวในวัฏภาคไอและเกิดการไพโรไลซิสตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 การควบแน่นของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ตามปฏิกิริยาที่ 4 จะได้วัสดุทนไฟและสารที่ควบแน่นได้ขึ้นในขณะที่การแตกตัวของวัฏภาคแก๊สที่อุณหภูมิสูงกว่าตามปฏิกิริยาที่ 5 จะได้พวกแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เมื่อถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะเกิดปฏิกิริยาที่ 3 และ 6 และเมื่อเกิดการควบแน่นของสารที่เหลืออยู่ในไอในภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดทำให้เกิดถ่านชาร์ขึ้น ซึ่งการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวตามปฏิกิริยาที่ 3 และได้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่สูง



รูปที่ 2.15 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน [15]

2.9 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจและคำนึงถึงอัตราและปริมาณของสารระเหย การกระจายตัวของชีวมวลและผลิตภัณฑ์ต่างๆ รวมถึงภาวะในการไพโรไลซิส โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ยังมีตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำ คัญได้แก่ อุณหภูมิในการไพโรไลซิส เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการไพโรไลซิส และผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.9.1 องค์ประกอบของชีวมวล

จากการศึกษาชีวมวลแต่ละชนิด [16] ชีวมวลจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกันไปตามส่วนต่างๆของพืช และชนิดของพืชนั้น ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางความร้อนและทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างกัน โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะมีการแตกตัวของโพลิแซคคาไลที่สายเชื่อมกลูโคสิดิค (Glucosidic linkage) ทำ ให้ได้น้ำมันชีวภาพหรือน้ำมันทาร์ที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีถ่านชาร์จำนวนน้อย ซึ่งลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นถ่านชาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วนความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณถ่านชาร์และเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยตรง

2.9.2 อุณหภูมิในการไพโรไลซิส (Temperature)

จากหลายงานวิจัยผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส [17] , [18] ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่จะได้ออกมา โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ขั้นคือ ขั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200-300 องศาเซลเซียส จะเป็นการระเหยความชื้นออกมาเป็นส่วนใหญ่ และมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย ซึ่งแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน ขั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง 300-500 องศาเซลเซียส จะมีการแตกตัวทางความร้อนและชีวมวลจะปล่อยสารระเหยประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ขั้นที่สามอุณหภูมิระหว่าง 500 - 800 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยแก๊สออกมาอีกเป็นครั้งที่สองพร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์และมีการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นส่วนใหญ่เป็นจำพวกไฮโดรเจนการศึกษาอุณหภูมิในการไพโรไลซิสชีวมวล ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 600-900 องศาเซลเซียส พบว่าเริ่มเกิดการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะเกิดการระเหยของสารระเหยต่างๆร้อยละ 75 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ

900 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิจะมีผลต่อปฏิกิริยาการไพโรไลซิสทั้งในด้านปริมาณและองค์ประกอบสารระเหยได้ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้น ปริมาณถ่านชาร์ลดลงและปริมาณแก๊สมากขึ้น

2.9.3 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน [19] , [20] เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ควบแน่นได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำ จะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า 103-105 องศาเซลเซียสต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ จะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นถ่านชาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ถ่านชาร์จำนวนน้อยมาก ในกระบวนการไพโรไลซิสถ้าอัตราการให้ความร้อนที่เร็วเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้มีมาก ปริมาณถ่านชาร์น้อย และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นและของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้นและโมเลกุลของน้ำมันชีวภาพที่อยู่ในภาวะแก๊สมีช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสั้นมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเกิดปฏิกิริยาน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้ายไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิและเวลาในการสลายตัวของน้ำมันชีวภาพน้อยทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและสมบัติของน้ำมันชีวภาพ จึงทำให้ได้น้ำมันชีวภาพ มีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก แต่ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลง โดยอัตราเร็วในการเกิดแก๊สแต่ละชนิดนั้นไม่แตกกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อนเนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบการทดลองนอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสในการเกิดถ่านชาร์ของชีวมวลมากกว่าถ่านหิน เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณเซลลูโลสสูง อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสของเซลลูโลส โดยเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่นของเซลลูโลสและเกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชั่นของเซลลูโลส โดยเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลลูโลสที่มีความอยู่ตัวมากขึ้นและได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้น แต่ถ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยอัตราการให้ความร้อนก็จะมีผลต่อปฏิกิริยาน้อยเพราะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก

2.9.4 ขนาดของอนุภาค (Particle size)

จากการศึกษาผลของขนาดของอนุภาค [21] , [22] มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เนื่องจากขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) คือ ขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นผิวที่สูง (Surface area) ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเครื่องปฏิกรณ์นั้นสูงตามไปด้วย และเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่า ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไปเมื่อเกิดการสลายตัวขั้นแรกจะสลายตัวต่อไปยังขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) ได้รวดเร็วมากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น แต่โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จากอนุภาคขนาดเล็กจะให้ผลมากกว่าจากอนุภาคขนาดใหญ่

2.9.5 ความดัน (Pressure)

ความดัน [23] เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อปริมาณผลิตภัณฑ์สารระเหยได้เนื่องจากเมื่อให้ความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) มากขึ้นซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่ความดันสูงและทำให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิมากขึ้นทำให้เกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงและทำให้เกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มมากขึ้นในขณะที่ให้ความดันต่ำปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นแก๊สลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลว น้ำ มันทาร์ และถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น

2.9.6 เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Residence time)

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน [24] มีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนน้อยเกินไปการสลายตัวทางความร้อนก็จะเกิดขึ้นได้น้อย และถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกตัวทางความร้อนที่มากและทำให้ได้ปริมาณของแก๊สเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสารระเหยต่างๆ จะเกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิต่อไปได้อีก และปริมาณถ่านชาร์จะมีแนวโน้มของร้อยละคาร์บอนองค์ประกอบลดลง เนื่องจากสารระเหยในตัวถ่านชาร์มีปริมาณลดน้อยลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.9.7 อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas)

อัตราการไหลของแก๊สตัวพามีผลต่อปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพามีค่าสูงจะทำ ให้แก๊สตัวพาขจัดสารระเหยต่างๆออกจากห้องเผาไหม้ได้เร็วขึ้นทำให้สารระเหยที่ควบแน่นได้ออกจากเครื่องปฏิกรณีได้เร็วขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงขึ้นและทำให้ถ่านชาร์ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สามารถแตกตัวทางความร้อนได้มากขึ้นด้วย และถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่ำ ทำให้สาระเหยต่างๆอยู่ในห้องเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิได้ทำให้สารประกอบที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ลดน้อยลง

2.10 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำ หนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำ และสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยองค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและเครื่องแมสสเปกโตมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ

2.10.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

ผลิตภัณฑ์ของแข็ง [19] จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ [19] สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นถ่านกัมมันต์ (เชื้อเพลิงไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดีเช่นเป็ นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2.10.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ผลิตภัณฑ์ของเหลว [25] จะประกอบด้วยน้ำ และสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนพทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีนโมเลกุลของน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C5-C6 ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (Light oil) ช่วงอุณหภูมิ น้อยกว่า 200 ^{0}C ได้แก่เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอีน เอทิลเบน ซีน

- น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 - 250 ^{0}C ได้แก่ฟีนอล ไพริดีน

- น้ำมันช่วงหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 -300 ^{0}C ได้แก่ไดเมทิล แนพทาลีน

- น้ำมันแอนทาซีน (Anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 - 350 ^{0}C ได้แก่ฟลูออรีน ฟีแนพทีน

- พีทช์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิ มากกว่า 350 ^{0}C ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (Red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

2.10.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

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

2.11 น้ำมันชีวภาพ

2.11.1 ลักษณะทั่วไป

น้ำมันชีวภาพ (Bio -oil) [3] เป็นของเหลวอินทรีย์สีน้ำตาลดำมีสารประกอบที่มีออกซิเจนอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก อาจมีชื่อเรียกอื่นๆ เช่น น้ำมันไพโรไลซิส ของเหลวไพโรลิกเนียส กรดไพโรลิกเนียส น้ำส้มควันไม้ ของเหลวควันไม้ ซึ่งของเหลวสีน้ำตาลดำ ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจะมีสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohols), อัลดีไฮด์ (Aldehydes), แอนไฮดัสซูการ์ (Anhydrosugars), ฟูแรน (Furans), คีโตน (Ketones) และ กรดอะซิติก (Acetic acid) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบรวดเร็วโดยการแตกสายโซ่โพลิเมอร์ (Depolymerizing) ของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่
อุณหภูมิสูงได้เป็นแก๊สและผ่านการควบแน่นเป็นของเหลวเป็นน้ำมันเบา (Light oil) และน้ำมันหนัก (Heavy oil) น้ำมันไพโรไลซิสเกิดขึ้นจากการแตกตัวทางความร้อนและการลดระดับเชิงพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามด้วยการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วเพื่อแช่แข็งปฏิกิริยาขั้นกลางให้ได้สารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างนี้โดยไม่ให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวต่อ หากมีเวลามากขึ้น น้ำมันดิบชีวภาพจึงมีสารเคมีที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงเป็นองค์ประกอบมากมาย ทำให้มี

สมบัติที่โดดเด่นและไม่ธรรมดา ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพขึ้นอยู่กับภาวะของกระบวนการไพโรไลซิส โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายน้ำได้มีสารอินทรีย์ที่มีประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 75- 80 โดยมวล และอีกร้อยละ 20 -25 เป็นน้ำ (ดังตารางที่ 2.3) น้ำมันชีวภาพมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 45 - 50 โดยมวล ซึ่งอยู่ในสารประกอบมากกว่า 300 ชนิดที่พบในน้ำมันดิบชีวภาพ

ในเชิงเคมีน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนระหว่างน้ำ กูไออาคอน คาเทคอล ไซริงกอล วานิลลิน ฟูรานคาร์บอกซัลดีไฮด์ ไอโซยูจีนอล ไพโรนส์ กรดแอซิติก กรดฟอร์มิก และกรดคาร์บอกซิลิกอื่นๆ และสารประกอบกลุ่มหลักๆ เช่น ไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ ไฮดรอกซีคีโตน น้ำตาล และสารประกอบฟินอลิกส์ น้ำมันชีวภาพอาจถือว่าเป็นสารประกอบแขวนลอย (Microemulsion) โดยมีสารประกอบโมเลกุลใหญ่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากลิกนินลอยอยู่ในสารละลาย ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวของกลุ่มโฮโลเซลลูโลส สารผสมแขวนลอยรักษาความเสถียรได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน และการเกิดนาโนมิเซล และไมโครมิเซล (Nano micelle, Micro micelle) ในเชิงกายภาพน้ำมันชีวภาพมีผงถ่านขนาดเล็กแขวนลอยอยู่และมีกลุ่มโลหะแอลคาไลเป็นส่วนประกอบ

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ [15]

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยมวล
น้ำ	20-30
C	44-47
H	6-7
O	46-48
N	0-0.2
S	< 0.01
เศษเถ้า	0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.11.2 สมบัติของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายได้ในน้ำ เมทานอล และเอทานอล แต่ไม่ละลายในน้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำมันชีวภาพสามารถกักเก็บได้ ปั๊มส่งได้ และสามารถใช้ในการเผาไหม้ได้คล้ายกับน้ำมันปิโตรเลียม โดยสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไม้กับน้ำมันเตาโดยน้ำมันชีวภาพไม่สามารถระเหยเป็นไอได้หมดในการกลั่น ที่อุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส จะเกิดการทำปฏิกิริยาในตัวเองได้กากของแข็งออกมาเป็นจำนวนมาก อาจถึงร้อยละ 50 โดยมวลและเป็นสารเคมีที่ไม่เสถียร มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติตามเวลา เช่น ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น อาจจะมีการแยกชั้น ความสามารถในการระเหยน้อยลง และมีการฝังตัวของยางเหนียว เป็นต้น ความไม่เสถียรจะเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง ในการใช้งานจึงต้องกักเก็บที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ [15]

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ
ความชื้น	15-30
ค่ากรดเบส	2.5
ความถ่วงจำเพาะ	1.2
คาร์บอน	54-58
ไฮโดรเจน	5.5-7.0
ออกซิเจน	35-40
ไนโตรเจน	0-0.2
เถ้า	0-0.2
ค่าความร้อน	16-19
ความหนืด	40-100
ของแข็ง	0.2-1
กากของแข็งจากการกลั่น	มากกว่า 50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.11.3 การนำน้ำมันชีวภาพไปประยุกต์ใช้

ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีค่าต่ำกว่าความร้อนเชื้อเพลิงฟอสซิล [26] เพราะมีสารประกอบที่มีหมู่ออกซิเจนและส่วนของน้ำ น้ำมันชีวภาพคล้ายกับน้ำมันเบาถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในด้านความหนืด ความเสถียร ค่าความเป็นกรด-เบส และระบบการปลดปล่อยแก๊สพิษ นอกจากนี้การควบแน่นส่วนของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลสามารถช่วยกำจัดน้ำออกจากน้ำมันชีวภาพได้และทำให้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้น

การผลิตแก๊สสังเคราะห์ ชีวมวลและน้ำมันชีวภาพสามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสะอาดได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ชีวมวลแข็งและการใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนสาหรับการผลิตแก๊ส พบว่าหากต้องการผลิตแก๊สในปริมาณมากจากชีวมวลบางชนิดในรูปของของแข็งจะพบปัญหาของปริมาณเถ้าสูง แต่เมื่อใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนซึ่งมีปริมาณเถ้าที่น้อยกว่าจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้และการขนส่งน้ำมันชีวภาพที่มีความหนาแน่นมากกว่าชีวมวลก็สามารถใช้อุปกรณ์และพาหนะที่ใช้ขนส่งน้ำมันปิโตรเลียมได้ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่ากรณีการขนส่งชีวมวลในรูปของแข็งนอกจากนี้ การทำแกซิฟิเคชันของน้ำมันชีวภาพโดยใช้ออกซิเจนร่วมทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์โทรป (Fisher Tropes)

น้ำมันชีวภาพมีข้อจากัดในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์โดยตรงเพราะน้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบหัวฉีดภายในเครื่องยนต์อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมาพบว่าสามารถใช้น้ำมันชีวภาพกับเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้ดังนั้นการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

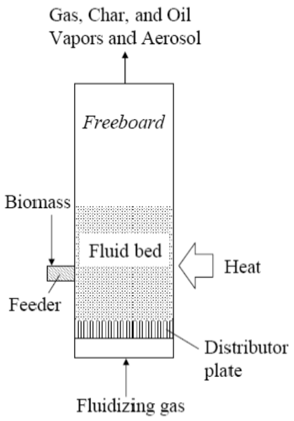
Chulalongkorn University

2.12 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพมี 5 ประเภท ได้แก่

2.12.1. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor)

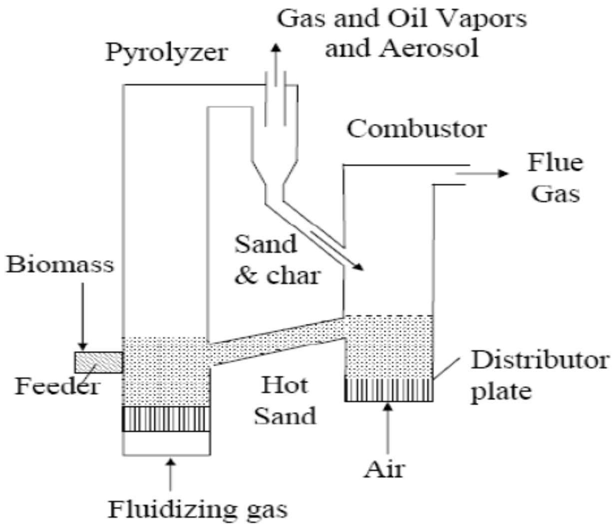
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำการป้อนอากาศจากทางด้านล่างของเบด ซึ่งแรงดันของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวจนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสอย่างสมดุล แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองแก๊สขึ้นแล้วเกิดการแทรกตัวขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด เมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ [27]

2.12.2. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน

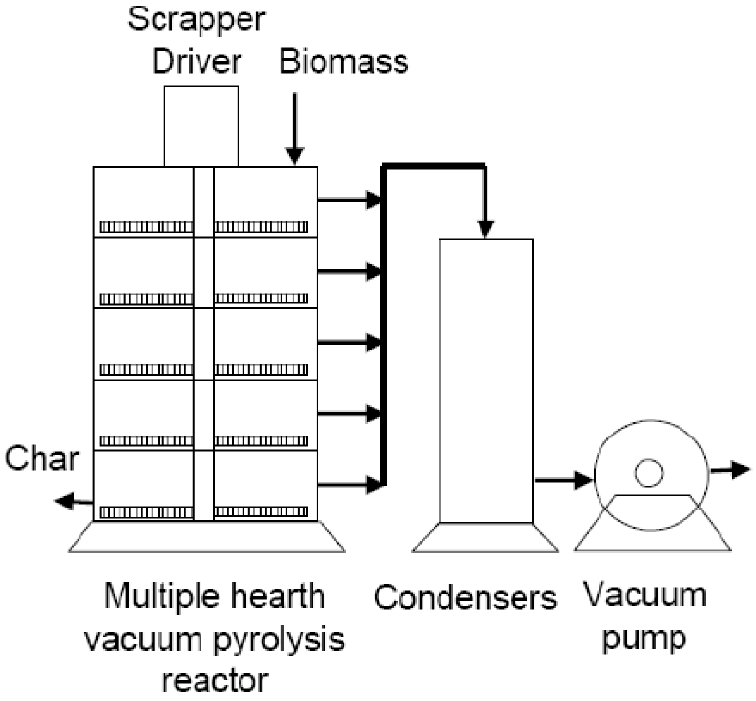
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed)เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสสูงขึ้นจนเบดบางส่วนหลุดได้ออกไป ดังนั้นต้องทำการติดตั้งไซโคลนเพื่อนำอนุภาคกลับมาในขณะที่แก๊สไหลผ่านไซโคลนไปทางด้านบนและกลับมาป้อนอีกครั้งทางล่างเบดดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน [15]

2.11.3. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor)

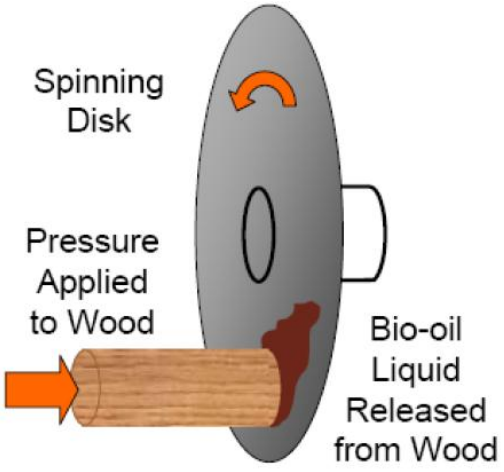
เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการสลายตัวของชีวมวล ภายใต้ภาวะการลดความดันและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์นาน ซึ่งต่างจากการไพโรไลซิสแบบเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเป็นไอกับกรณีของการไพโรไลซิสแบบเร็วแล้วจะเกิดได้เร็วเหมือนกันโดยความดันที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 15 กิโลปาสคาล ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 เครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ [15]

2.11.4. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor)

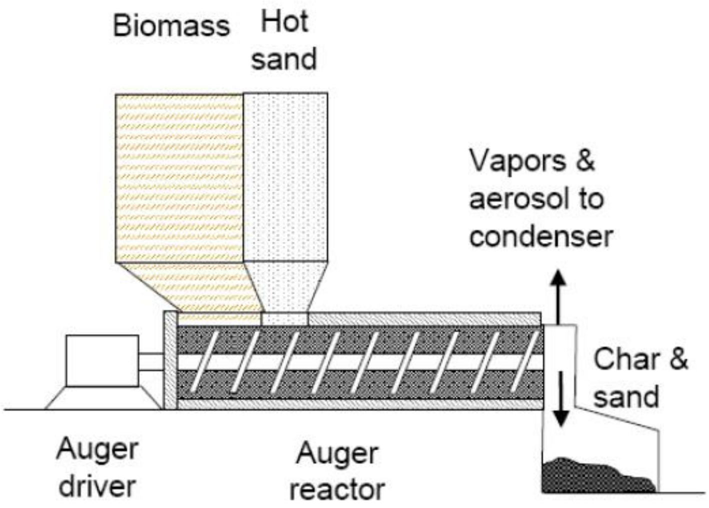
เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor)เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่ชีวมวลเคลื่อนที่ไปชนกับของแข็งซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยจุดเด่นของระบวนการแอบลาทีฟไพโรไลซิสคือ การให้ความดันสูงในการป้อนอนุภาคชีวมวลบนผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่ร้อนซึ่งจะทำให้เกิดแรงหมุนเหวี่ยง ส่งผลให้อนุภาคชีวมวลจะเคลื่อนที่ชนกับผนังเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสจึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 เครื่องปฏิกรณ์แบบแอบลาทีฟ [15]

2.11.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (Auger reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (Auger reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ใช้แก๊สตัวพาและใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นการทำงานแบบต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ไอที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน [17]

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Su และคณะ [28] ศึกษาการไพโรไลซิสของฟางข้าวและขี้เลื่อยของไม้ไผ่โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดที่มีองค์ประกอบของระบบแยกถ่านชาร์และทำการศึกษาอิทธิพลของปฏิกิริยาที่ภาวะต่างๆ สำหรับฟางข้าวทำการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 415-540 องศาเซลเซียส และสำหรับขี้เลื่อยของไม้ไผ่ช่วงอุณหภูมิ 350-510 องศาเซลเซียส มีการศึกษาขนาดอนุภาคของชีวมวล อัตราการป้อนของชีวมวล และชนิดของแก๊สตัวพา พบว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพสำหรับฟางข้าว คือ 440-500 องศาเซลเซียสและสำหรับขี้เลื่อยไม้ไผ่ 405-440 องศาเซลเซียส ผลการทดลองของขี้เลื่อยของไม้ไผ่พบว่าปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพอยู่ที่มากกว่าร้อยละ 70 ของน้ำหนักขี้เลื่อยของไม้ไผ่ เมื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง พบว่าเมื่อให้อัตราของสารป้อนเร็วและขนาดอนุภาคเล็ก ส่งผลทำให้ได้ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพมีปริมาณเพิ่มขึ้น

Zheng และคณะ [29] ศึกษาการไพโรไลซิสต้นฝ้ายแบบเร็ว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 480-530 องศาเซลเซียส ได้น้ำมันชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ผลการทดลองได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ร้อยละ 55 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีแมสสเปกโตทรเมทรี-แก๊สโครมาโทรกราฟฟี พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยน้ำ กรด และสารประกอบเฮทเทอโรไซคลิก วิเคราะห์ค่าความร้อนอยู่ที่ 17.77 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ความคงตัว การละลาย และค่าการกัดกร่อนใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซลสามารถน้ำไปใช้ในการเผาไหม้หม้อไอน้ำ หรือ เตาเผา หรือนำไปกลั่นแยกใช้ในยานพาชนะ

Lu และคณะ [30] ศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากแกลบโดยศึกษาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 550 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดยวิธีอินดักทีฟ-คัพเปิลพลาสมาอะตอมมิก-แอบซอร์บชั่น-สเปกโทรเมตรี วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่าประกอบไปด้วยสารมากกว่า 50 ชนิด เช่นกรด แอลกอฮอล์ ฟีนอล เอสเทอร์ คีโตน แอลดีไฮด์ ฟูแรน และทดสอบสมบัติพื้นฐาน การคงสภาพ ความหนืด การหล่อลื่น การสึกหรอ จะมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

Lee และคณะ [26] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาการปรับสภาพ และระบบการจัดถ่านชาร์ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวผ่านกระบวนการไพโลซิสแบบเร็วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้มีปริมาณโลหะอัลคาไลน์ต่ำ โดยส่วนใหญ่จะติดออกมาจากการกำจัดถ่านชาร์และการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นจะช่วยลดปริมาณโลหะอัลคาไลน์ และการปรับสภาพส่งผลให้ได้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีความบริสุทธิ์ปลอดภัยและเพิ่มมูลค่าได้ง่ายขึ้น โดยน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

ตัวอย่างเช่น เชื้อเพลิงในการพัฒนาสามารถใช้โดยตรงหรือผสมกับเชื้อเพลิงทางการค้า ข้อดีของการประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันต่ำ ผลิตภัณฑ์แก๊สหลักที่ได้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนที่อุณหภูมิสูงปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและแก๊สอื่นๆค่าความร้อนสูงและ ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 15 เมกะจูลต่อกิโลกรัม โดยสามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานหรือใช้เป็นตัวดูดซับแก๊ส ได้แก่ แอมโมเนีย

Liaw และคณะ [17] ศึกษาผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากไม้ดักลาส ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน ศึกษาที่อุณหภูมิ 200 ถึง 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากอัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผนังเครื่องปฏิกรณ์ และอนุภาคของชีวมวลต่ำกว่า อุณหภูมิของของแข็งที่เหลือจะต่ำกว่าอยู่ระหว่าง 117 และ 420 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ (ร้อยละผลได้สูงสุด 59 โดยน้ำหนัก) จะมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เคยรายงานไว้สำหรับการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (ร้อยละผลได้มากกว่า 60 โดยน้ำหนัก) โดยที่ 500 องศาเซลเซียสจะให้ผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพสูงสุด (ผลิตภัณฑ์ของแข็งถูกทำให้ร้อนขึ้นเป็น 328 องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมินี้ร้อยละผลได้สูงสุดของผลิตภัณฑ์จากไม้ดักลาสจะพบสารประกอบของฟูแรนและฟีนอล ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาขั้นที่สองของเทอร์โมเคมิคอลล์ สารประกอบฟีนอล เมทานอล และแก๊สจะเพิ่มขึ้นกับอุณภูมิ ร้อยละผลได้จากปฏิกิริยาขั้นที่สองจะสูงกว่าที่ได้รายงานไว้สำหรับการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟูอิไดซ์เบด ในทุกกรณี ร้อยละผลได้ของน้ำ (ร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก) ได้รับเมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบออเกอร์ ซึ่งสามารถเทียบได้กับการใช้วัตถุดิบอื่นในเครื่องปฏิกรณ์ฟูอิไดซ์เบดที่ได้รายงานไว้ จากผลการทดลองเป็นการยืนยันว่าเครื่องปฏิกรณ์ออเกอร์ จะให้ร้อยละผลได้ที่ดีทั้งน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

Chulalongkorn University

บทที่ 3

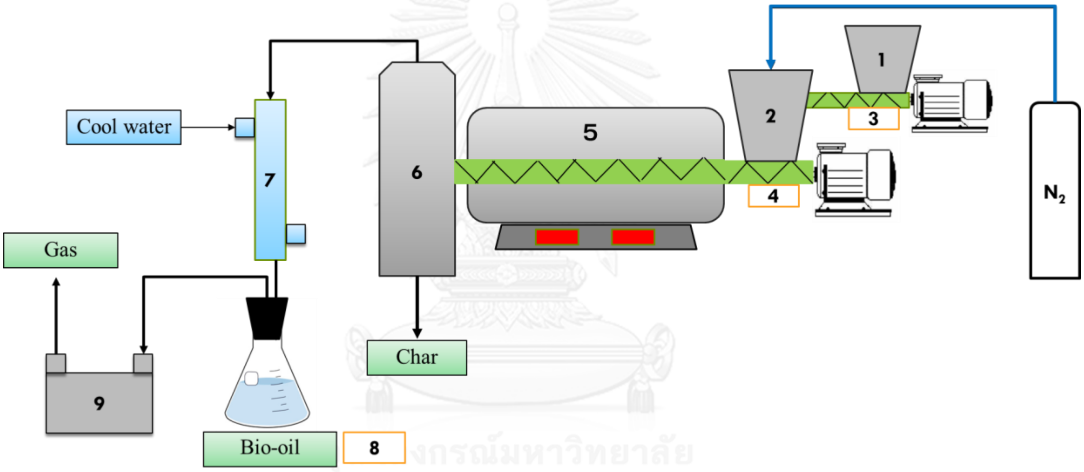
เครื่องมือและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาอบ ใช้อบไล่ความชื้นของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสตั้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซียเซส อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. เครื่องคัดขนาดและตะแกรงร่อนขนาด เครื่องมือคัดขนาดและตะแกรงร่อนคัดขนาดของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดลองของตะแกรง ของ Endecott SHAKER EF.1-1M411 ทำงานด้วยไฟฟ้า 220/240 โวลต์ 50 เฮิร์ตตะแกรงร่อนขนาด 0.25,05,0.85,1และ 2 มิลลิเมตร

3. ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

หมายเลข 1 ตัวเก็บสารสำหรับใส่ชีวมวล

หมายเลข 2 ตัวเก็บสารระบบปิดเพื่อกันอากาศเข้าสู่ระบบ

หมายเลข 3 ชุดสกรูขนาดยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร

หมายเลข 4 ชุดสกรูขนาดยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

หมายเลข 5 เตาเผา

หมายเลข 6 ตัวแยกสารสำหรับแยกถ่านชาร์

หมายเลข 7 ตัวควบแน่นสาร

หมายเลข 8 ขวดเก็บน้ำมันชีวภาพ

หมายเลข 9 ปั้มสุญญากาศ

รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสำหรับการไพโรไลซิสที่ใช้ในการทดลองจริง โดยประกอบไปด้วยหมายเลข 1 และ 2 ตัวเก็บสาร (Hopper 1) หมายเลข 3 ชุดสกรู (Screw feeder 1) ขนาดยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร หมายเลข 4 ชุดสกรู (Screw feeder 2) ขนาดยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรแสดงดังรูปที่ 3.1 เป็นชุดสกรูที่พาชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ หมายเลข 5 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ หมายเลข 6 ตัวแยกถ่านชาร์ (Separator) ทำหน้าที่แยกถ่านชาร์ออกและกักเก็บไว้ หมายเลข 7 ตัวควบแน่นสาร (Condenser) ทำหน้าที่ควบแน่นสารระเหย หมายเลข 8 ถังเก็บน้ำมันชีวภาพ หมายเลข 9 ปั้มสุญญากาศ (Vacumn pump) และหมายเลข 10 ถังแก๊สไนโตรเจนพร้อมโรตามิเตอร์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบกับแมสสเปกโทรมิเตอร์ (Gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 โดยมีเครื่องแมสสเปกโทรมิเตอร์ รุ่น 5975C inert XL MSD เป็นดีเทคเตอร์ จากบริษัท Agilent จำกัด โดยใช้ Capillary column จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น HP-5MS ขนาด 30 เมตร x 0.250 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบกับแมสสเปกโทรมิเตอร์

จากรูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบกับแมสสเปกโทรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 มี detector แบบ Thermal Conductivity Detector จากบริษัท Agilent จำกัด ใช้ในการหาองค์ประกอบของแก๊ส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

จากรูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHNO analysis) วิเคราะห์หาค่า คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน รุ่น LECO – CHN2000

รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN2000

จากรูปที่ 3.6 เครื่อง Parr 6200 Calorimeter ใช้ในการหาค่าความร้อนของสารผลิตภัณฑ์ น้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์หาค่าความร้อนรุ่น Parr 6200 Calorimeter

3.2 สารตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง ระหว่าง 0.25-0.5 มิลลิเมตร,0.5-0.85 มิลลิเมตร,0.85-1 มิลลิเมตรและมากกว่า 1 มิลลิเมตร

2. แก๊สไนโตรเจนร้อยละ 99.99 บรรจุในถังความดันสูงบริษัท BIG (ประเทศไทย) จำกัด

3. เอททานอลร้อยละ 95

4. เตตระไฮโดรฟูแรน (THF)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมและวิเคราะห์ชีวมวล

1. นำขี้เลื่อยยูคาลิปตัสคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25-0.5 มิลลิเมตร,0.5-0.85 มิลลิเมตร,0.85-1 มิลลิเมตรและมากกว่า 1 มิลลิเมตร

2. อบขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

3. นำขี้เลื่อยยูคาลิปตัสไปวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D3173-D3175)

4. นำขี้เลื่อยยูคาลิปตัสไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D3176)

5. นำขี้เลื่อยยูคาลิปตัสไปวิเคราะห์หาค่าความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสและปริมาณกำมะถันรวม (ASTMD2015 และ ASTMD3177)

6. วิเคราะห์ค่าการสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/Differential Thermal Analysis(TG/DTA)

7. วิเคราะห์หาปริมาณโลหะในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิค X-ray fluorescence

3.3.2 การออกแบบการทดลอง

1. ทำการทดลองผลของขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25-0.5 มิลลิเมตร,0.5-0.85 มิลลิเมตร ,0.85-1 มิลลิเมตรและมากกว่า 1 มิลลิเมตรโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที

2. ออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับโดยมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) ระดับสูง (1) และระดับกลาง (0) โดยมีตัวแปรที่ศึกษา 3 ตัวแปรคือคือ อุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200 และ 600 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 0 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 แสดงปัจจัยและระดับที่ใช้ในการศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (+1)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	A	450	500	600
อัตราการป้อนสาร (รอบต่อนาที)	B	200	400	600
อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	C	0	100	200

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับเพื่อการศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

การทดลอง	สัญลักษณ์	A	B	C
1	1	-	-	-
2	A	+	-	-
3	B	-	+	-
4	C	-	-	+
5	AB	+	+	-
6	AC	+	-	+
7	BC	-	+	+
8	ABC	+	+	+
9	Center	0	0	0
10	Center	0	0	0
11	Center	0	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 วิธีการทดลอง

1. ทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนที่อัตรา 200 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อทำการไล่อากาศหรือออกซิเจนออกจากระบบ

2. เปิดเครื่องปฏิกรณ์และทำการตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตามตัวแปรที่จะศึกษาของกระบวนการโดยเริ่มต้นที่ 450 องศาเซลเซียส

3. เมื่ออุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์มีค่าตามที่กำหนดไว้ นำเอาขี้เลื่อยยูคาลิปตัสปริมาณ 100 กรัมใส่ลงในตัวเก็บสาร ตามขนาดที่กำหนดไว้ได้แก่ 0.25-0.5,0.5-0.85,0.85-1 มิลลิเมตรและมากกว่า 1 มิลลิเมตรโดยทำการทดลองแบบสุ่ม โดยทำขนาดละ 2 ครั้ง

4. ปรับความเร็วของสกรูที่ใช้ในการป้อนสาร ที่อัตรา 200 รอบต่อนาที

5. เปิดเครื่องทำน้ำเย็นเข้าสู่คอนเดนเซอร์เพื่อให้สารระเหยเกิดการควบแน่นได้

6. เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สออกจากเครื่องปฏิกรณ์สู่ระบบควบแน่น

7. คำนวณหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง

8. ทำซ้ำโดยการสุ่มขนาดอนุภาค และบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรของขนาดอนุภาคและหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

9. ศึกษาตัวแปรของอุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนโดยทำตามขั้นตอน 1-7 โดยปรับค่าตัวแปรต่างๆ โดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับประสมกลางดังแสดงในตาราง 3.1 และ 3.2 เพื่อศึกษาปัจจัยทั้งสามและหาภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

3.3.4 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

1. วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมี

- วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ด้วย Bomb Calorimeter
- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันและถ่านชาร์
- การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพด้วย FTIR
- วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโทรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)
- การวิเคราะห์จำนวนโปรตอนในโครงสร้างพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ (H^1-NMR)

Chulalongkorn University

2. วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทั่วไป

- วิเคราะห์ค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rheometer
- วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)
- วิเคราะห์สภาพการละลาย (Solubility)
- วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในนามัน ตามมาตรฐาน ASTM D 524-04
- วิเคราะห์ปริมาณของแข็งในน้ำมันชีวภาพ
- วิเคราะห์ปริมาณ total acid ด้วยการไตเตรต

3.4 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง

การคำนวณปริมาณน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์และแก๊ส คำนวณได้ดังสมการ [31]

- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ (% Liquid yield) $= \frac{W_{\text{น้ำมันชีวภาพ}}}{W_{\text{ชีวมวล}}} \times 100$
- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของถ่าชาร์ (% Solid yield) $= \frac{W_{\text{ถ่านชาร์}}}{W_{\text{ชีวมวล}}} \times 100$
- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (% Gas yield) = 100 -ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว - ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง

$W_{\text{น้ำมันชีวภาพ}}$ = น้ำหนักของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลอง

$W_{\text{ถ่านชาร์}}$ = น้ำหนักของถ่านชาร์ที่ได้จากการทดลอง

$W_{\text{ชีวมวล}}$ = น้ำหนักของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และค่าความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และค่าความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส โดยพบว่าขี้เลื่อยยูคาลิปประกอบไปด้วยความชื้นร้อยละ 11.48 โดยน้ำหนัก ขี้เถ้าร้อยละ 1.23 โดยน้ำหนัก คาร์บอนคงตัวร้อยละ 7.28 โดยน้ำหนัก และสารระเหยสูงถึงร้อยละ 80.01 โดยน้ำหนัก ซึ่งในส่วนของสารระเหยที่มีมากจะทำให้เกิดน้ำมันชีวภาพมากขึ้น และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่าขี้เลื่อยยูคาลิปตัสประกอบไปด้วย คาร์บอนร้อยละ 45.03 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 5.25 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.42 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 49.20 โดยน้ำหนัก และพบกำมะถันน้อยกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก กำมะถันนั้นในการเผาไหม้สามารถทำให้เกิดแก๊ส SO_x ซึ่งเป็นมลพิษ ซึ่งในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสมีน้อยมากทำให้เมื่อนำไปไพโรไลซิสแล้วจะไม่เกิดมลพิษขึ้น และขี้เลื่อยยูคาลิปตัสมีความร้อนอยู่ที่ 16.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.1 proximate analysis and ultimate analysis ของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

Proximate Analysis*	**%wt.**
Moistures	11.48
Ash	1.23
Volatiles matter	80.01
Fix Carbon	7.28
Total	100
Ultimate Analysis*	
C (%wt.)	45.03
H (%wt.)	5.35
N (%wt.)	0.42
S (%wt.)	0.01
O (%wt.)**	49.19
HHV (MJ/kg)	16.8

*พื้นฐานแห้ง **จากผลต่าง

4.1.2 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคการแยกสกัด

ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสพบว่าขี้เลื่อยยูคาลิปตัสประกอบไปด้วย เซลลูโลสร้อยละ 47.37 ± 0.92 โดยน้ำหนัก เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 11.52 ± 1.23 โดยน้ำหนัก ลิกนินร้อยละ 25.52 ± 0.83 โดยน้ำหนักและขี้เถ้าร้อยละ 1.37 ± 0.51 โดยน้ำหนัก

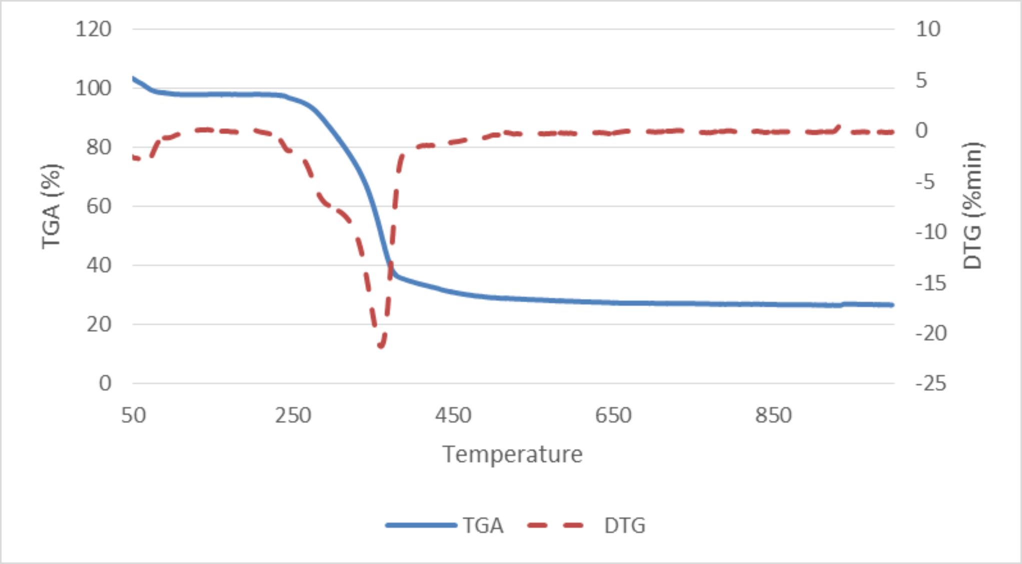
ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

ส่วนประกอบ*	**ร้อยละโดยมวล**
เซลลูโลส	47.37 ± 0.92
เฮมิเซลลูโลส	11.52 ± 1.23
ลิกนิน	25.52 ± 0.83
ขี้เถ้า	1.37 ± 0.51

*พื้นฐานแห้ง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.3 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric analysis, TG/DTA)



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TG) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ความดันบรรยากาศไนโตรเจนที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TG/DTA) ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีในสภาวะไนโตรเจนอัตราการป้อนไนโตรเจนที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูป 4.1 พบว่าในช่วงแรกจนถึง 100 องศาเซลเซียส ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสมีการสูญเสียน้ำหนักไปเล็กน้อยซึ่งที่อุณหภูมินี้เป็นการสูญเสียความชื้นของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส โดยอัตราการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่ 360 องศาเซลเซียสซึ่งขี้เลื่อยยูคาลิปตัสสลายตัวไปร้อยละ 77 โดยน้ำหนักและเหลือขี้เถ้าอยู่ร้อยละ 23 โดยน้ำหนัก

4.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-Ray Fluorescence)

จากตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-Ray Fluorescence) พบว่า องค์ประกอบของชีวมวลประกอบไปด้วย $C_6H_{10}O_5$ ถึงร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก และพบ แคลเซียมร้อยละ 0.299 โดยน้ำหนัก โพแทสเซียมร้อยละ 0.277 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นธาตุที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต และพบธาตุโซเดียม แมกนิเซียม และธาตุโลหะส่วนใหญ่อยู่ในหมู่อัลคาไลด์และอัลคาไลด์เอิร์ธซึ่งเป็นธาตุที่สามารถกัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิสูงได้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะในขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
$C_6H_{10}O_5$	99
Ca	0.299
K	0.277
Si	0.0903
P	0.0883
Cl	0.0747
Na	0.0578
Mg	0.0499
Al	0.0306
Fe	0.0263
S	0.0202
Mn	<0.01
Ti	<0.01
Cu	<0.01
Zn	<0.01
Sr	<0.01
Ni	<0.01
Rb	<0.01
Sum	100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ

ในการทำไพโรไลซิสขี้เลื่อยยูคาลิปตัสจะประกอบไปด้วย 4 ตัวแปรได้แก่

1. ผลของขนาดอนุภาค 4 ขนาด 0.25-0.5,0.5-0.85,0.85-1 และ 1-2 มิลลิเมตร
2. อุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร และอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน ออกแบบการทดลองแบบเชิงประกอบสองระดับประสมกลาง

โดยข้อที่ 1 ทำการทดลองซ้ำสองครั้งแบบสุ่ม และข้อ 2 สำหรับการออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับประสมกลาง

4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ

ศึกษาผลของปัจจัยของขนาดอนุภาค 4 ขนาด 0.25-0.5,0.5-0.85,0.85-1 และ 1-2 มิลลิเมตรโดยแสดงผลดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจะพบผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 38-49 โดยน้ำหนักโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและแสดงค่าทางสถิติดังตาราง 4.5

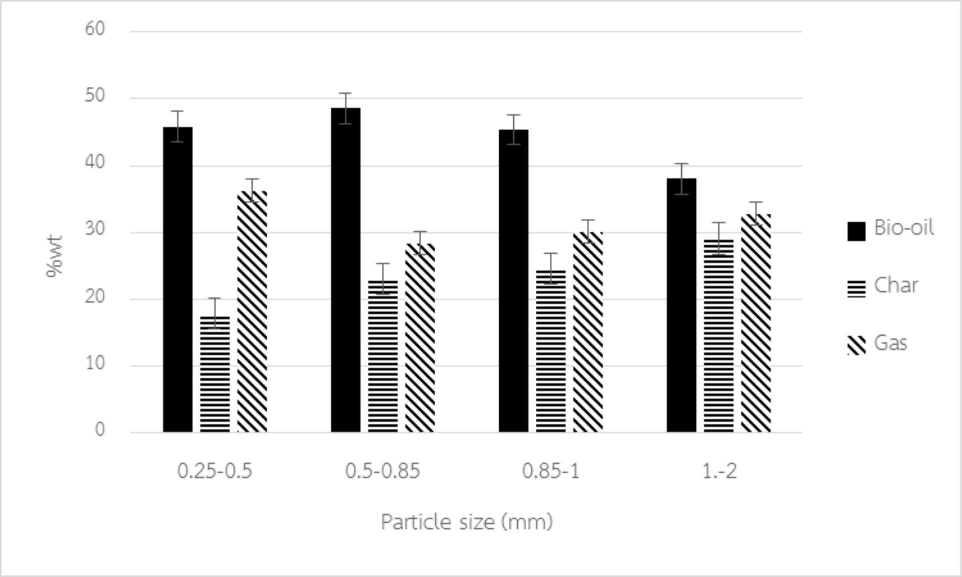
ตารางที่ 4.4 ผลของอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

Particle Size (mm)	Liquid (%wt.)		Liquid Average	Solid (%wt.)		Solid Average	Gas (%wt.)		Gas Average
	1	2		1	2		1	2	
0.25-0.5	46.12	45.52	45.82	17.77	18.02	17.895	36.11	36.46	36.285
0.5-0.85	48.55	48.52	48.535	23.33	22.7	23.015	28.12	28.78	28.45
0.85-1	46.37	44.35	45.36	24.41	24.59	24.5	29.22	31.06	30.14
1.-2	37.41	38.64	38.025	29.91	28.28	29.095	32.68	33.08	32.88

ตาราง 4.5 ผลทางสถิติของผลของอนุภาคของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ

Source	SS	DF	MS	F	P-value	
Model	121.3439	3	40.44797	54.34546	0.0011	significant
Size	121.3439	3	40.44797	54.34546	0.0011	
Pure Error	2.9771	4	0.744275			
Cor Total	124.321	7				
R-Squared	0.9760					

เมื่อนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติได้ผลดังตาราง 4.5 จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยขนาดของอนุภาคมีผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว จากผลของค่า R-Squared ที่ 0.9760 พบว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำในทางสถิติและค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสมีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ



รูปที่ 4.2 ผลของอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคที่ 0.5-0.85 มิลลิเมตรให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุด โดยขนาดที่เล็กกว่าเมื่อป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่า และมีการสัมผัสกับเครื่องปฏิกรณ์ได้มากกว่าทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีขึ้นทำให้ได้ปริมาณของน้ำมันชีวภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่มากขึ้นทำให้การถ่ายโอนความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้เกิดการแตกตัวได้น้อยกว่าทำให้เหลือผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้นสังเกตุจากกราฟเมื่อขนาดเล็กลงทำให้ได้ปริมาณถ่านชาร์ที่สูงขึ้นไปด้วย แต่เมื่อขนาดของชีวมวลมีขนาดเล็มาก ทำให้เกิดการถ่ายโอนทางความร้อนได้ดีขึ้นทำให้มีสารระเหยในระบบมากอาจทำให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิขึ้นทำให้สารระเหยที่สามารถควบแน่นได้กลายเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้ขนาดอนุภาคที่ 0.25-0.5 มิลลิเมตรจะได้แก๊สมากกว่า 0.5-0.85 มิลลิลิตร

จากการทดลองจึงเลือกขนาดอนุภาคของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่ 0.5-0.85 มิลลิเมตรในการศึกษาตัวแปรอื่นต่อไป

4.2.2 ผลของปัจจัยต่างๆจากการออกแบบการทดลองเชิงซ้อนสองระดับ

ศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน ด้วยการออกแบบการทดลองสองระดับ โดยใช้ขนาดของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่ 500 – 850 ไมโครเมตร แสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของการผลิตน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณีแบบต่อเนื่อง

การทดลอง	สัญลักษณ์	A	B	C	Liquid	Solid	Gas
1	1	-	-	-	36.93	23.48	39.59
2					38.82	19.3	41.88
3	A	+	-	-	35.4	18.57	46.03
4					37.45	20.54	42.01
5	B	-	+	-	36.13	24.98	38.89
6					36.54	23.5	39.96
7	C	-	-	+	51.12	23.73	25.15
8					52.67	23.19	24.14
9	AB	+	+	-	35.31	16.63	48.06
10					37.53	15.42	47.05
11	AC	+	-	+	37.11	18.64	44.25
12					40.86	18.38	40.76
13	BC	-	+	+	41.08	22.03	36.89
14					42.3	22.47	35.23
15	ABC	+	+	+	39.42	18.88	41.7
16					41.54	18.21	40.25
17	Center	0	0	0	46.51	19.71	33.78
18					46.15	19.1	34.75
19					45.82	20.31	33.87

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

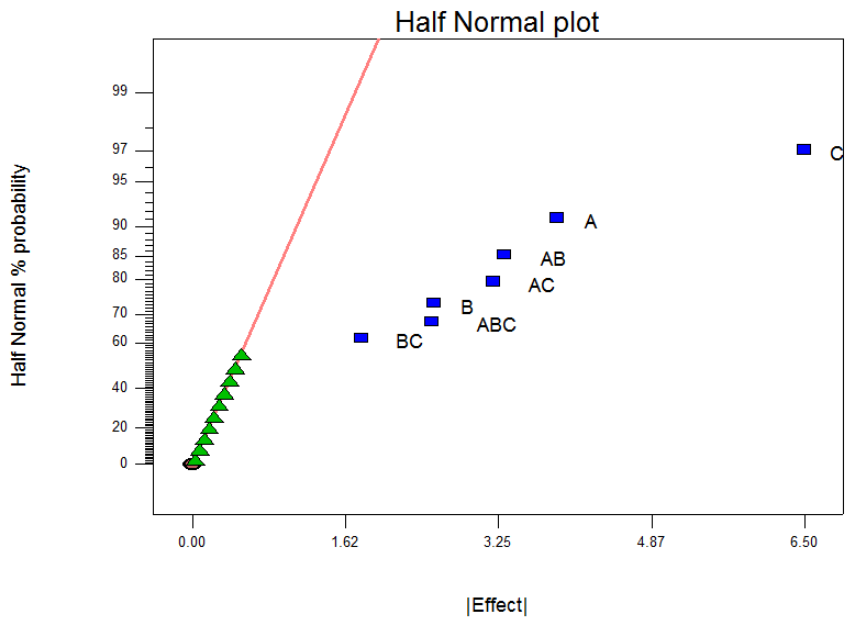
จากตารางแสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊สจากการไพโรไลซิสขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพนั้นอยู่ในช่วงร้อยละ 35.31-52.67 โดยน้ำหนักเพื่อนำไปหาค่าความแปรปรวนและปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิสขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยโปรแกรม Design expert โดยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) จะสามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นจะต้องมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวแปรด้วยวิธี ANOVA ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลทางสถิติของการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของการผลิตน้ำมันชีวภาพ

Source	SS	DF	MS	F	P-value	
Model	378.3025	7	54.04321	30.1957	<0.0001	significant
A	59.94631	1	59.94631	33.49395	0.0002	
B	26.29126	1	26.29126	14.68978	0.0033	
C	168.935	1	168.935	94.38949	<0.0001	
AB	43.79131	1	43.79131	24.46763	0.0006	
AC	40.67251	1	40.67251	22.72505	0.0008	
BC	12.83431	1	12.83431	7.170945	0.0232	
ABC	25.83181	1	25.83181	14.43307	0.0035	
Curvature	95.4545	1	95.4545	53.33354	<0.0001	significant
Pure Error	17.89765	10	1.789765			
Cor Total	491.6546	18				

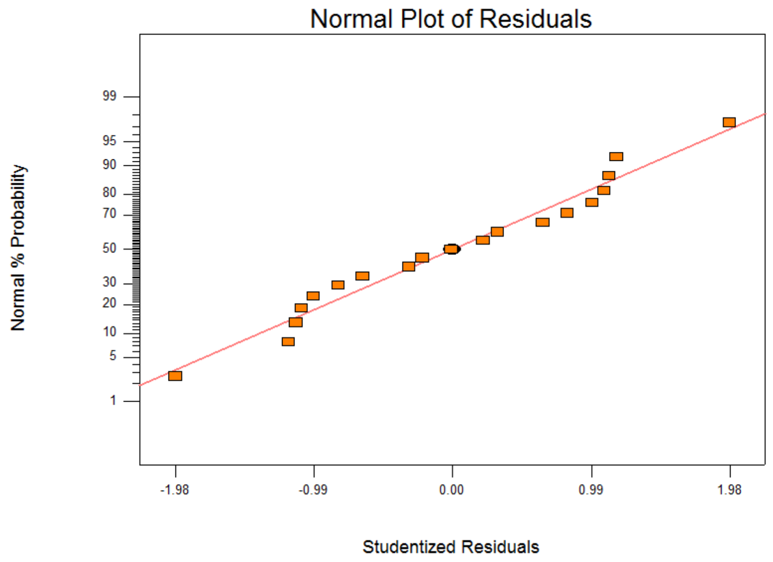
จากตารางแสดงค่าความแปรปรวนและปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพคือ อุณหภูมิในการไพโรไลซิส (A) อัตราการป้อนสาร (B) และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (C) และยังพบว่าอันตรกริยาของตัวแปรทั้ง 3 อุณหภูมิในการไพโรไลซิสกับอัตราการป้อนสาร (AB) อัตราการป้อนสารกับอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (BC) อุณหภูมิในการไพโรไลซิสกับอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (AC) และอันตรกริยาของทั้งอุณหภูมิในการไพโรไลซิสอุณหภูมิในการไพโรไลซิส อัตราการป้อนสาร อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (ABC) มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งมีค่า P-value ตามที่กำหนดคือน้อยกว่า 0.05 ซึ่ง

สอดคล้องกับกราฟ Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว แสดงได้ดังรูปที่ 4.3

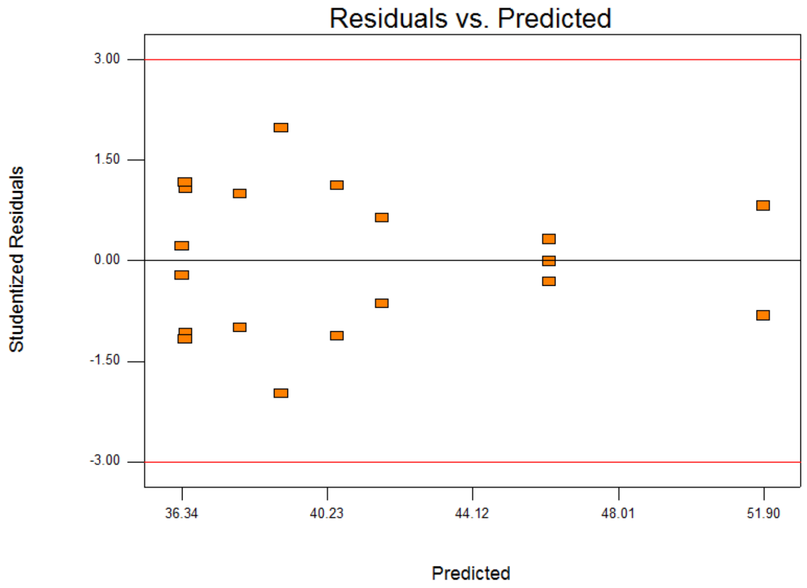


รูปที่ 4.3 กราฟ Half Normal probability plot

จากกราฟแสดงให้เห็นตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องซึ่งจะพบว่าเบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงได้แก่ A B C AB AC BC และ ABC ซึ่งเป็นตัวแปรและอันตรกริยาที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.4 กราฟ normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวของการไพโรไลซิสขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง residuals กับ predicted ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวของการไพโรไลซิสขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.5 เมื่อนำผลที่ได้ไปสร้างกราฟ normal plot of residuals ซึ่งแสดง normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวของการไพโรไลซิสขี้เลื่อยยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง R-Squared = 0.9548 และนำข้อมูลไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง residuals กับ predicted ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กันและกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำมาวิเคราะห์โดยการทำ ANOVA ได้

4.2.3 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลของปัจจัยของอุณหภูมิที่ 400-600 องศาเซลเซียสโดยแสดงผลดังตารางที่ 4.8 ซึ่งจะพบผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 32.325-50.19 โดยน้ำหนักโดยการทดลองที่อัตราการป้อนสาร 200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาทีและขนาดอนุภาคของชีวมวลที่ 0.5-0.85 มิลลิเมตรและแสดงค่าทางสถิติดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

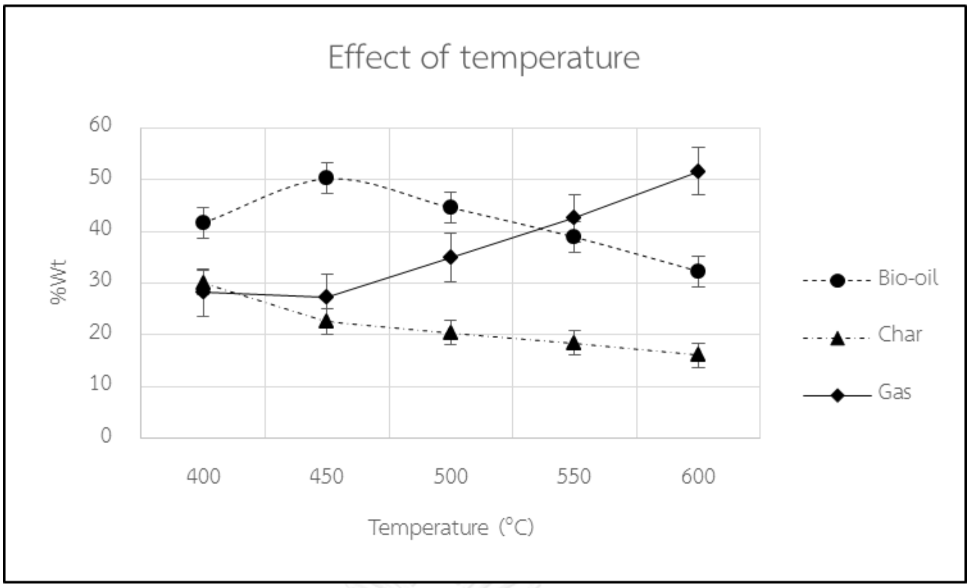
อุณหภูมิ (^{o}C)	Liquid (%wt.)			Solid (%wt.)			Gas (%wt.)		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
400	41.15	42.23	41.69	30.21	29.93	30.07	39.86	30.21	35.03
450	49.71	50.67	50.19	22.03	23.19	22.61	54.78	22.03	38.40
500	43.72	45.51	44.61	21.12	19.71	20.41	59.17	21.12	40.14
550	37	40.86	38.93	18.64	18.38	18.51	62.98	18.64	40.81
600	32.5	32.15	32.32	16.22	15.89	16.05	67.89	16.22	42.05

ตารางที่ 4.9 ผลทางสถิติของอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ

Source	SS	DF	MS	F	p-value	
Model	352.0569	4	88.01423	43.32645	0.0005	significant
Temperature	352.0569	4	88.01423	43.32645	0.0005	
Pure Error	10.1571	5	2.03142			
Cor Total	362.214	9				
R-Squared	0.9720					

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลวจากผลของค่า R-Squared ที่ 0.9720 พบว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำในทางสถิติและค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงให้เห็นว่าขนาดของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ พบว่าช่วงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีปริมาณสูง ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์สูงที่สุด แต่ในส่วนของปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลของความร้อนที่ให้แก่ระบบยังไม่เพียงพอต่อการสลายตัวของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส ทำให้เกิดการไพโรไลซ์ที่น้อยทำให้ปริมาณของถ่านชาร์คงเหลือมาก เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 450 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 50.19 โดยน้ำหนัก และผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ลดลงเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกตัวของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสเป็นสารระเหย (Thermal cracking) เกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้า ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันชีวภาพและแก๊สเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยา (4.1) และ (4.2)

$$\text{Thermal cracking: } pCnHx \longrightarrow qCmHy + rH_2 \quad (4.1)$$

$$\text{Carbon formation: } C_nH_x \longrightarrow nC + x/2H_2 \quad (4.2)$$

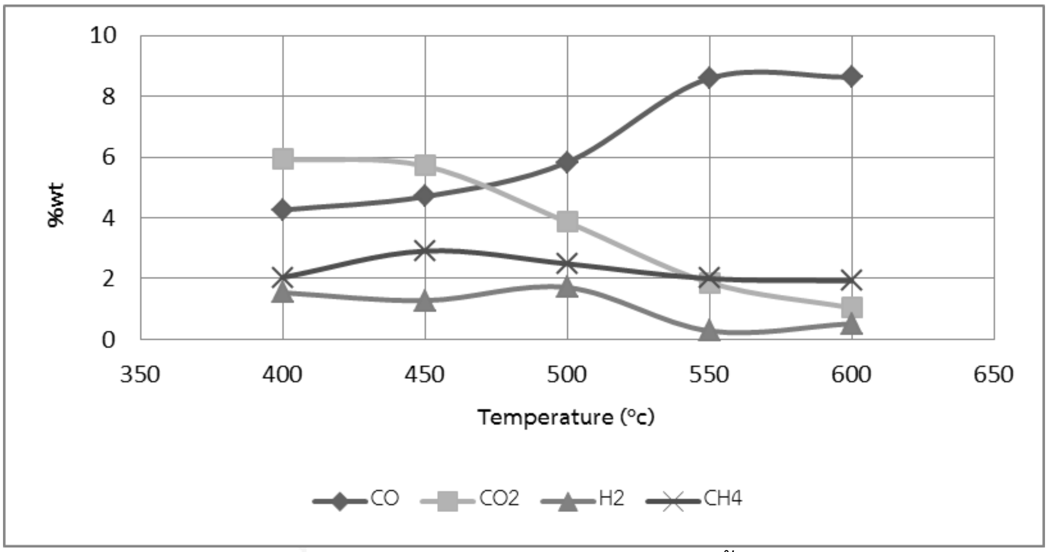
จากปฏิกิริยา (4.1) และ (4.2) เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 450 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์มีค่าลดลง ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะส่งต่อการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิอย่างต่อเนื่องทำให้ปริมาณของสารระเหยที่สามารถควบแน่นได้มีการสลายตัวต่อไปได้แก๊สที่

ไม่สามารถควบแน่นได้ (Uncondensable gas) มากขึ้นเป็นผลทำให้มีสารระเหยที่สามารถควบแน่นได้แตกตัวไปเป็นแก๊สมากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมีค่าลดลง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพพบว่าที่ 450 องศาเซลเซียสให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ร้อยละ 50.19 โดยน้ำหนัก

4.2.4 ปัจจัยของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น

จากการทดลองได้ทำการศึกษาแก๊สที่เกิดขึ้นจากการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อแก๊สที่เกิดขึ้น

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของอุณภูมิต่อปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้น โดยจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์มีปริมาณที่สูงขึ้นแต่คาร์บอนไดออกไซด์กลับมีปริมาณที่ลดลง และไฮโดรเจนกับมีเทนมีปริมาณที่คงที่เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาบลูดูอาดได้ดีขึ้นแสดงได้ดังสมการ (4.3)

$$\text{Boudouard reaction : } C + CO_2 \rightarrow CO \quad (4.3)$$

เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับถ่านชาร์ที่ร้อนทำให้เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์มากขึ้นทำให้เห็นได้ว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงและคาร์บอนมอนออกไซด์เพิ่มขึ้นซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป

4.2.5 ผลของอัตราการป้อนสารต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลของปัจจัยของอัตราการป้อนสารที่ 200-400 รอบต่อนาทีโดยแสดงผลดังตารางที่ 4.10 ซึ่งจะพบผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 42.69-50.19 โดยน้ำหนักโดยการทดลองที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาทีและขนาดอนุภาคของชีวมวลที่ 0.5-085 มิลลิเมตรและแสดงค่าทางสถิติดังตาราง 4.11

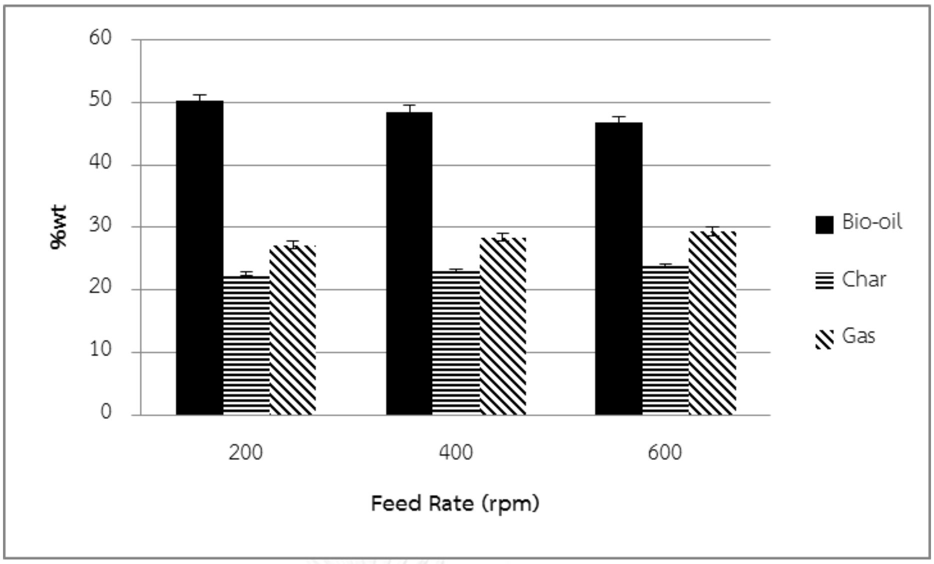
ตารางที่ 4.10 ผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

feed rate (rpm)	Liquid (%wt.)			Solid (%wt.)			Gas (%wt.)		
	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
200	49.71	50.67	50.19	22.03	23.19	22.61	28.26	26.14	27.2
400	48.52	48.55	48.535	22.7	23.33	23.015	28.78	28.12	28.45
600	47.05	46.53	46.79	23.73	23.95	23.84	29.22	29.52	29.37

ตารางที่ 4.11 ผลทางสถิติของอิทธิผลของอัตราการป้อนสารต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ

Source	SS	DF	MS	F	p-value	
Model	11.5627	2	5.78135	29.0788	0.0109	significant
Feed rate	11.5627	2	5.78135	29.0788	0.0109	
Pure Error	0.59645	3	0.198817			
Cor Total	12.15915	5				
R-Squared	0.9509					

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยอัตราการป้อนสารมีผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว จากผลของค่า R-Squared ที่ 0.9167 พบว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำในทางสถิติและค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสมีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ



รูปที่ 4.8 ผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.8 แสดงผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เมื่ออัตราการป้อนสารที่ 200 400 และ 600 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารปริมาณของน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มที่ลดลง และปริมาณของถ่านชาร์สูงขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราการป้อนสารที่ต่ำทำให้เวลาที่ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น เวลาในการแตกตัวสูงขึ้น (Residence time) และปริมาณที่ชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์น้อยทำให้เกิดการสัมผัสความร้อนได้ทั่วถึงในขณะที่อัตราการป้อนสารสูงเวลาที่ชีวมวลจะอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นั้นน้อย เวลาในการแตกตัวลดลง (Residence time) และชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ชีวมวลกระจายตัวในเครื่องปฏิกรณ์ได้ไม่ดีทำให้ชีวมวลสัมผัสความร้อนไม่ทั่วถึง เมื่อลดอัตราการป้อนสารลงทำให้ชีวมวลเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้นทำให้ได้ปริมาณของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้นและปริมาณของถ่านชาร์นั้นลดลงส่วนปริมาณของแก๊สนั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.6 ผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลของปัจจัยของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ 0-200 มิลลิลิตรต่อนาทีโดยแสดงผลดังตารางที่ 4.12 ซึ่งจะพบผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 38.325-51.69 โดยน้ำหนัก โดยการทดลองที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสอัตราการป้อนสารที่ 200 รอบต่อนาทีและขนาดอนุภาคของชีวมวลที่ 0.5-085 มิลลิเมตรและแสดงค่าทางสถิติดังตาราง 4.13

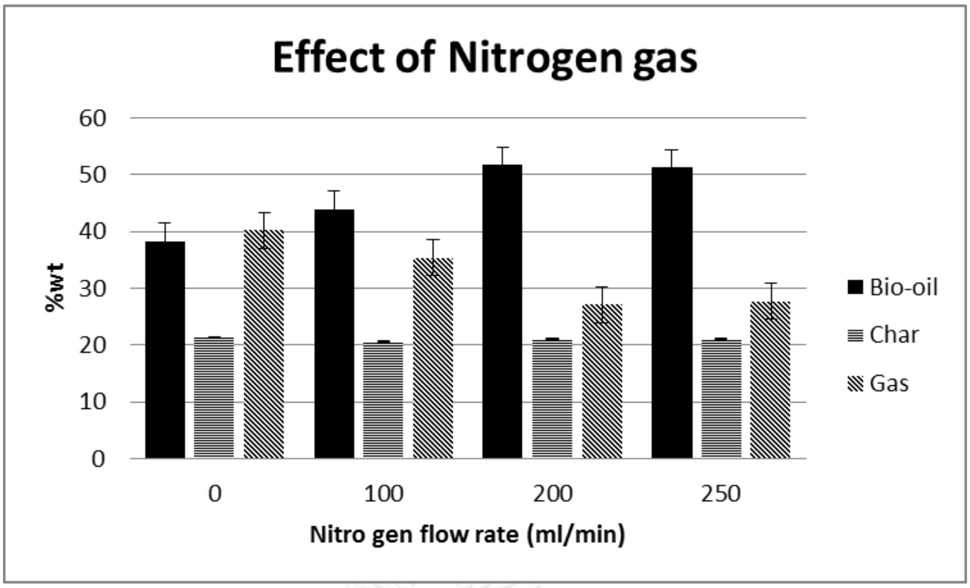
ตารางที่ 4.12 ผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

N2 Gas	Liquid (%wt.)			Solid (%wt.)			Gas (%wt.)		
ml/min	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
0	37.83	38.82	38.325	23.48	19.3	21.39	38.69	41.88	40.285
100	43.72	44.15	43.935	22.35	19.1	20.725	33.93	36.75	35.34
200	50.71	52.67	51.69	22.03	20.19	21.11	27.26	27.14	27.2
250	50.65	51.68	51.165	22.05	20.22	21.135	27.3	28.1	27.7

ตารางที่ 4.13 ผลทางสถิติของอิทธิผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ

Source	SS	DF	MS	F	P-value	
Model	180.1569	2	90.07845	107.9516	0.0016	significant
N2Gas	180.1569	2	90.07845	107.9516	0.0016	
Pure Error	2.5033	3	0.834433			
Cor Total	182.6602	5				
R-Squared	0.9863					

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว จากผลของค่า R-Squared ที่ 0.9863 พบว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำในทางสถิติและค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงให้เห็นว่าขนาดของอัตราการป้อนแก๊สมีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ



รูปที่ 4.9 แสดงผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.9 แสดงผลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองจะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนแล้วสู่ระบบ แก๊สไนโตเจนจะทำหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) ซึ่งจะนำสารระเหยที่สามารถควบแน่นได้ออกจากระบบได้เร็วขึ้นและชีวมวลสามารถแตกตัวได้เพิ่มขึ้นทำให้ได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่สูงขึ้น จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ได้น้ำมันชีวภาพสูงขึ้น และเห็นได้ว่าเมื่อเราไม่ได้ป้อนแก๊สไนโตรเจนเพื่อเป็นแก๊สตัวพาแล้วสารระเหยที่ควบแน่นได้จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ช้า ทำให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิขึ้นทำห้สารระเหยที่สามารถควบแน่นได้แตกตัวเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ทำให้ปริมาณของแก๊สเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนแก๊สสูงขึ้นเกิน 200 มิลลิลิตรต่อนาทีพบว่าแนวโน้มของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 มีปริมาณที่เท่ากับที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาทีดังนั้นจึงเลือกอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาทีในการทดลอง

4.3 การคำนวณหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องโดยใช้โปรแกรม design-expert

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องโดยใช้โปรแกรม design-expert โดยขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องแสดงดังตารางที่ 4.14 โดยในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ขนาดของชีวมวลเท่า 0.5-0.85 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.14 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

Name	Goal	Lower limit	Upper limit	Unit
Temp	in the range	450	550	^{o}C
Feed rate	in the range	200	600	rpm
N_2 Gas	in the range	0	200	ml/min
Bio-oil	maximize	30	100	%wt.

การหาภาวะที่เหมาะสมพิจารณาค่าตอบสนองคือร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพโดยกำหนดขอบเขตของตัวแปร อุณหภูมิอยู่ในช่วง 450-500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200-600 รอบต่อนาทีอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 0-200 มิลลิลิตรต่อนาที ขอบเขตที่ศึกษาของร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพคือร้อยละ 30 -100 โดยน้ำหนัก โดยจะพิจารณาให้มีค่าตัวแปรผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-Expert ในการหาภาวะที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม Design-Expert พบว่าภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการค้านวณของโปรแกรม Design-Expert ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร	ภาวะที่เหมาะสม (design-expert)
อุณหภูมิในการไพโรไลซิส(องศาเซลเซียส)	450.02
อัตราการป้อนสารชีวมวล (รอบต่อนาที)	200.33
อัตราการป้อนแก๊สตัวพาหรือแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	200
ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ	51.88

จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม design-expert พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพคือที่ อุณหภูมิ 450.02 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200.33 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ร้อยละ 51.88 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำภาวะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม design-expert เทียบกับการทดลองจริงผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร	ภาวะที่เหมาะสม (design-expert)	ผลการทดลอง
อุณหภูมิในการไพโลไรซ์ (องศาเซลเซียส)	450.02	450
อัตราการป้อนสารชีวมวล (รอบต่อนาที)	200.33	200
อัตราการป้อนแก๊สตัวพาหรือแก๊สไนโตรเจน	200	200
ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ	51.88	52.67

จากตารางที่ 4.16 ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองจริงคือร้อยละ 52.67 โดยน้ำหนักและจากโปรแกรม design-expert คือร้อยละ 51.88 โดยน้ำหนักซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่ามีที่ใกล้เคียงกัน

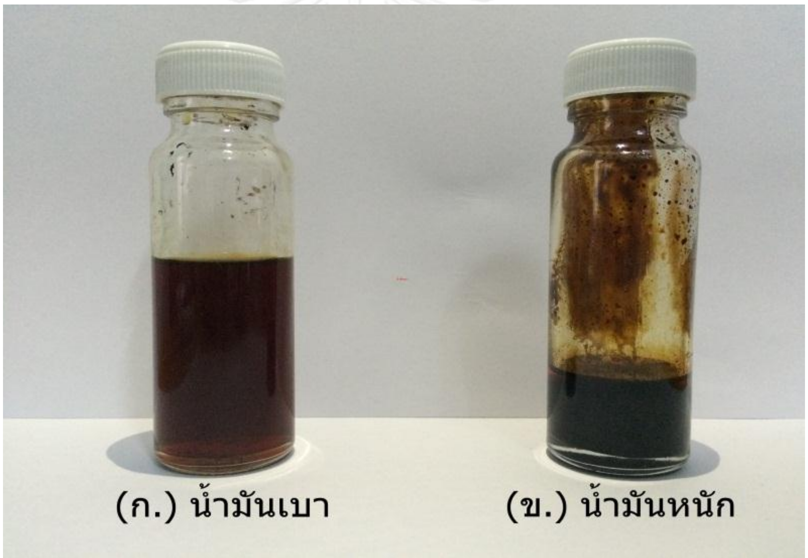
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4 ศึกษาอัตราส่วนน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องในภาวะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.17 ร้อยละของน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก

ครั้งที่	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก
1	52.67	30.05	22.62
2	51.87	29.53	22.34
3	52.35	29.68	22.67
เฉลี่ย	52.3	29.75	22.54



รูปที่ 4.10 น้ำมันเบาและน้ำมันหนัก

จากตารางที่ 4.17 แสดงปริมาณน้ำเบาและน้ำมันหนักในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง จากการทดลองพบว่าน้ำมันชีวภาพนั้นแบ่งได้สองส่วนคือน้ำมันเบาและน้ำมันหนักโดยมีอัตราส่วนน้ำมันเบาต่อน้ำมันหนักที่ 5.7:4.3 ซึ่งน้ำมันเบาจะมีสีที่ใสเป็นสีส้มและน้ำมันหนักจะทึบแสงเป็นสีดำและมีความหนืดที่สูงกว่าโดยการแยกน้ำมันสองชนิดนี้ด้วยกรวยแยกสกัด

4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ

4.5.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

ตาราง 4.18 แสดงองค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์

	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก	ถ่านชาร์	ขี้เลื่อยยูคาฯ
คาร์บอน (%wt.)	11.27	52.66	44.53	45.03
ไฮโดรเจน (%wt.)	9.83	6.3	1.65	5.35
ไนโตรเจน (%wt.)	0.01	0.24	0.87	0.42
ออกซิเจน (%wt.)	78.89	40.8	52.95	49.2
H/C (mole/mole)	10.47	1.44	0.44	1.43
O/C (mole/mole)	5.25	0.58	0.89	0.82
ค่าความร้อน (MJ/kg)	-	28.05	17.5	16.8

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันเบา น้ำมันหนัก และถ่านชาร์แสดงค่า CHNO analysis ดังตารางที่ 4.18 พบว่าน้ำมันเบามีค่าร้อยละของออกซิเจนสูงเนื่องจากน้ำมันเบามีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำและกรดอะซิติก ส่วนน้ำมันหนักนั้นมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ทำให้มีค่าร้อยละของคาร์บอนสูงกว่าน้ำมันเบาและร้อยละของออกซิเจนน้อยกว่าน้ำมันเบา และในถ่านชาร์จะมีค่า CHNO analysis ใกล้เคียงกับขี้เลื่อยยูคาลิปตัสตอนเริ่มต้น

4.5.2 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันหนักอยู่ที่ 28.05 เมกะจูลต่อกิโลกรัมซึ่งให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าชีวมวล และน้ำมันเบาไม่สามารถหาค่าความร้อนได้เนื่องจากน้ำมันเบามีน้ำเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก และค่าความร้อนของถ่านชาร์มีค่าสูงกว่าชีวมวลอยู่เล็กน้อยเพราะถ่านชาร์นั้นมีส่วนประกอบของความชื้นและสารระเหยที่น้อยกว่าจากการผ่านกระบวนการไพโรไลซิสทำให้ค่าความร้อนมีค่าที่สูงขึ้นเนื่องจากมีร้อยละคาร์บอนคงตัวที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนัก

4.5.2 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ

ตารางที่ 4.19 สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ

สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหนัก	ขี้เลื่อยยูคาลิปตัส	ทะลายปาล์ม	ฟางข้าว	NaraBia*
ความหนาแน่น (kg/m^3)	1097	1058	1105	880
ความหนืด 40 องศาเซลเซียส (cSt)	0.79	0.76	0.81	N/A
ขี้เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.63	11.86	16.76	0.04
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.6	N/A	N/A	N/A
ค่าความเป็นกรดเบส (pH)	3.5	3.61	3.34	5.2
ค่าความเป็นกรดเบส (mgKOH/g)	1.91	N/A	N/A	N/A

* หมายเหตุ Narabia เป็นนามันดิบจากบริษัท ปตท จากัด (มหาชน)

ตารางที่ 4.19 เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางกายาพของน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยการหาความหนาแน่น ความหนืด ขี้เถ้า ปริมาณของของแข็ง และค่าความเป็นกรดเบส โดยนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่มาจากทะลายปาล์ม [32] และฟางข้าว [33] ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อนื่อง

4.5.3.1 ค่าความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมันชีวภาพ

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพที่มาจากทะลายปาล์มและฟางข้าวซึ่งมีค่าเท่ากับ 1097 กิโลกรัมต่อลูกบากศ์เมตร และจากการวัดค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียสก็พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพที่มาจากทะลายปาล์มและฟางข้าวเช่นเดียวกัน

4.5.3.2 ขี้เถ้าและปริมาณของแข็งในน้ำมันชีวภาพ

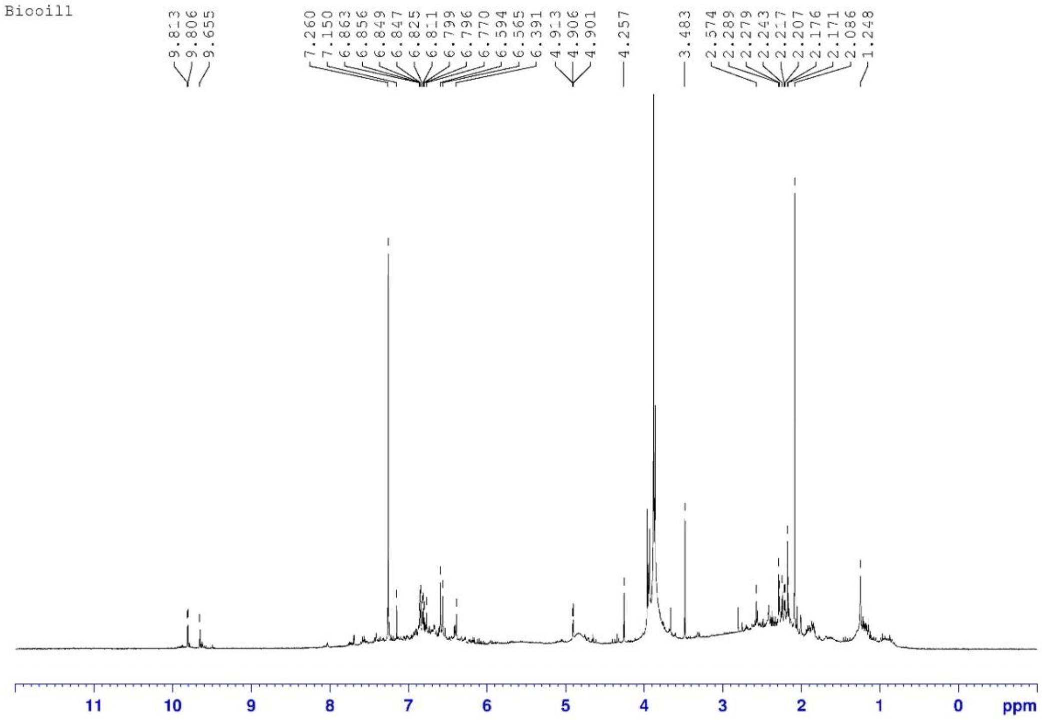
จากการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งและขี้เถ้าในน้ำมันชีวภาพ โดยทำการหาปริมาณของแข็งทำโดยชั่งน้ำหนักน้ำมันหนัก 2-3 กรัมละลายใน เอททานอลร้อยละ 95 จากนั้นนำไปกรองสุญญากาศชั่งกระดาษกรองก่อนและหลังกรองจะได้ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ในน้ำมันชีวภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ 5.6 โดยน้ำหนักและจากการเผาน้ำมันหนักเหลือขี้เถ้าร้อยละ 5.63 โดยน้ำหนักซึ่งมีค่าน้อยกว่าน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวและทะลายปาล์มเนื่องมากจากชีวมวที่เป็นสารตั้งต้นขี้เลื่อยยูคาลิปตัสมีปริมาณขี้เถ้าที่น้อยมากจึงทำให้มีผ่านกระบวนการไพโลไรซ์แล้วน้ำมันหนักที่ได้จะมีขี้เถ้าน้อยตามไปด้วย

4.5.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH and total acid value)

จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง จาก pH meter พบว่ามีค่า pH ที่ใกล้เคียงกันระหว่างน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสกับชีวมวลชนิดอื่นแต่ยังมีค่าความเป็นกรดที่มากกว่าน้ำมันดิบจาก Narabia เนื่องมาจากน้ำมันชีวภาพนั้นมีองค์ประกอบจำพวกฟีนอลและหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ทำให้มีความเป็นกรดสูง และจากการวัดค่าความเป็นกรดด้วยการไตเตรตมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 1.91 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมและในส่วนของน้ำมันเบานั้นมีความความเป็นกรดที่สูงกว่าอยู่ที่ 20.91 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ

4.6.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (H-NMR)



รูปที่ 4.11 ภาพการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคโปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (H-NMR)

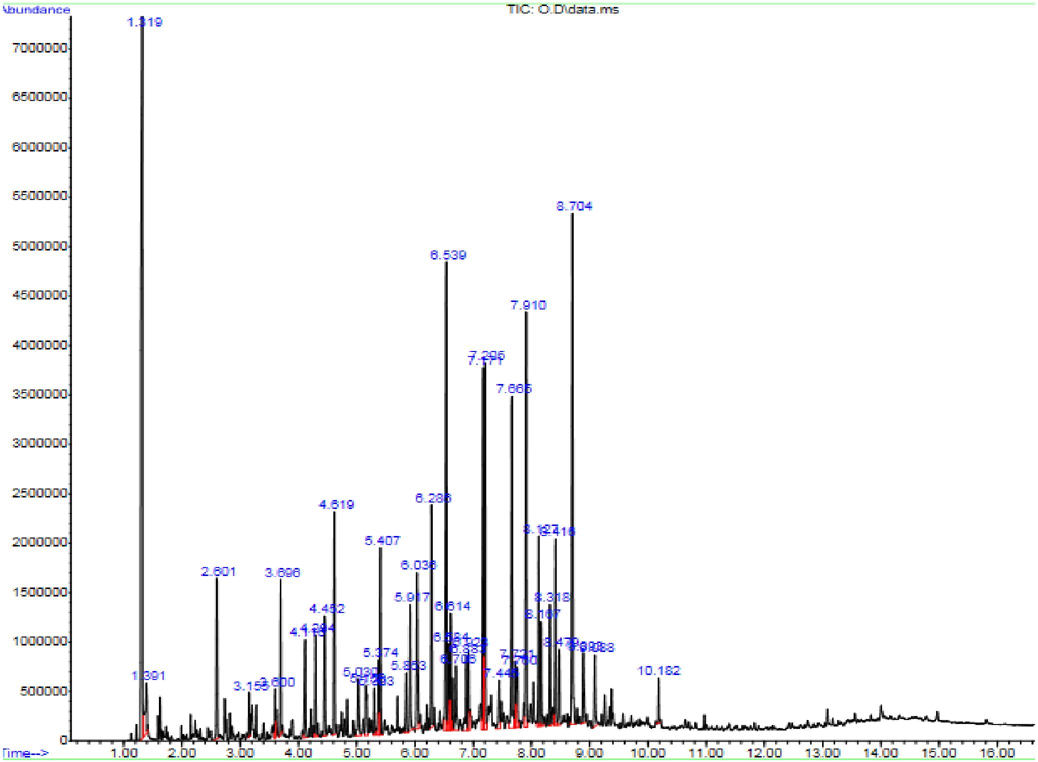
ตารางที่ 4.20 ผลการวเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (H-NMR)

Type of hydrogen	chemical shift (ppm)	Bio-oil mole (% of total hydrogen)
Aromatic	6.39-7.26	19.03
Aliphatic adjacent to oxygen	3.48-4.91	28.83
Aliphatic adjacent to aromatic/alkene group	2.08-2.58	40.02
Other Aliphatic	0.80-1.25	12.12

จากผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (H-NMR) ซึ่งพบว่ามีหมู่อะโรมาติกที่ตำแหน่ง 6.39-7.26 ที่ร้อยละ 19.03 ของไฮโดรเจน ที่ตำแหน่ง 3.48-4.91 พบหมู่อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับออกซิเจนที่ร้อยละ 28.83 ของไฮโดรเจน ที่ตำแหน่ง 2.08-2.58 พบหมู่อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับกลุ่มอะโรมาติกและแอลคีนสูงที่สุดที่ร้อยละ 40.02 ของไฮโดรเจนและที่ตำแหน่ง 0.80-1.25 พบหมู่อะลิฟาติกที่ตัวอื่นที่ร้อยละ 12.12 ของไฮโดรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.6.2 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ- แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS)



รูปที่ 4.12 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสแสดงโครมาโทรแกรมดังรูปที่ 4.12 วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ - แมสสเปกโตรเมทรี พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันชีวภาพนั้นประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซีและคาร์บอกซิลดังแสดงในตารางที่ 4.21 เช่นกลุ่มคีโตน ฟีนอล และแอลกอฮอล์ ซึ่งฟีนอลเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ- แมสสเปกโตรเมทรีนี้ ส่งผลให้น้ำมันชีวภาพมีร้อยละของออกซิเจนที่สูงและมีค่าความเป็นกรดกับความหนืดที่สูงและไม่เสถียรเมื่อได้รับความร้อน

ตารางที่ 4.21 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ

peak	ref.	peak area	name
1	1.319	14.77	Carbon disulfide
2	1.392	1.43	Acetic acid
3	2.602	2.12	Furfural
4	3.157	0.43	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-
5	3.599	0.53	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-
6	3.694	1.68	Phenol
7	4.115	1.52	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3
8	4.293	1.14	Phenol, 2-methyl-
9	4.453	1.76	Phenol, 3-methyl-
10	4.618	2.7	Phenol, 2-methoxy-
11	5.03	1.1	Phenol, 3,5-dimethyl-
12	5.16	1.02	Phenol, 4-ethyl-
13	5.303	0.56	Phenol, 2-methoxy-3-methyl-
14	5.372	1.12	Catechol
15	5.407	2.41	2-Methoxy-5-methylphenol
16	5.853	0.89	1,2-Benzenediol, 3-methyl-
17	5.918	1.79	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-
18	6.035	2.8	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-
19	6.287	2.74	2-Methoxy-4-vinylphenol
20	6.538	7.58	Phenol, 2,6-dimethoxy-
21	6.586	1.24	3-Allyl-6-methoxypheno
22	6.616	1.56	Phenol, 3,4-dimethoxy-
23	6.707	1.1	4-Ethylcatechol
24	6.881	1.22	Vanillin
25	6.924	1.02	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)...

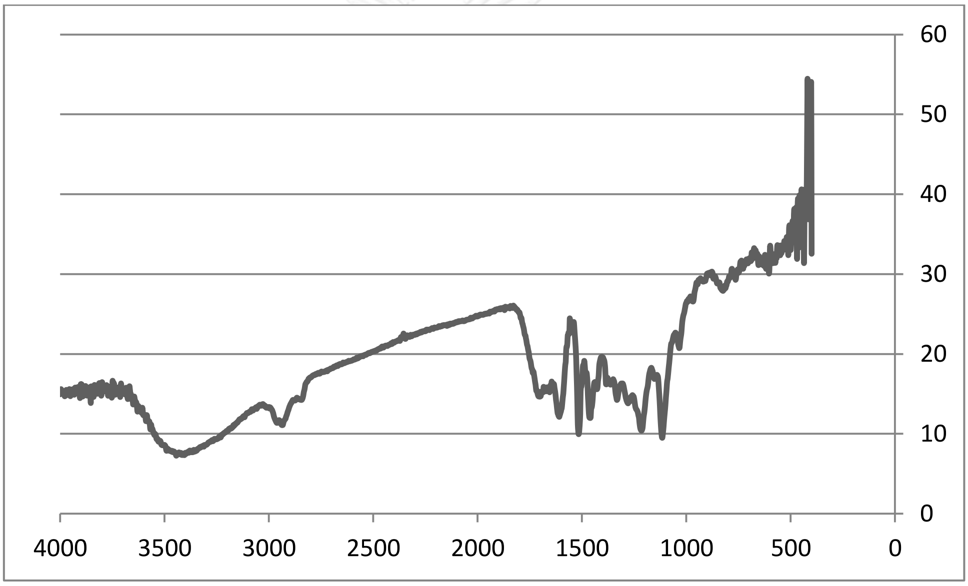
ตารางที่ 4.21 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ (ต่อ)

peak	ref.	peak area	name
25	6.924	1.02	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)...
26	7.171	5.28	3-Hydroxy-4-methoxybenzoic acid
27	7.206	5.65	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-
28	7.444	0.87	Apo Cynin
29	7.665	4.87	Hydroquinone mono-trimethylsilyl...
30	7.722	0.86	2,5-Dihydroxy-4-isopropyl-2,4,6-...
31	7.761	1.18	Flopropione
32	7.908	5.59	2,3,5,6-Tetrafluoroanisole
33	8.125	2.56	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-prope...
34	8.168	1.35	4-Propyl-1,1'-diphenyl
35	8.416	2.54	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-prope...
36	8.481	1.02	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dime...
37	8.702	7.55	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-prope...
38	8.892	1.24	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimet...
39	9.087	1.14	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylace...
40	10.184	0.52	3,5-Dimethoxy-4-hydroxycinnamald...

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.6.3 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

จากการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี แสดงผลดังรูปที่ 4.13 ที่ได้จากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสจากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องพบว่าส่วนประกอบ หรือหมู่ฟังก์ชั่นของน้ำมันชีวภาพนั้นประกอบไปด้วย พันธะระหว่างหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนซึ่ง เป็นสารประกอบจำพวกฟีนอลหรือแอลกอฮอล์ พันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนและฮโดรเจน ซึ่งเป็น สารประกอบจำพวกอัลเคน พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนซึ่งเป็นสารประกอบจะพวกคีโตน หรือ อัลดีไฮด์ พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอนซึ่งเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกและ พันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนซึ่งเป็นสารประกอบจำพวก อีเทอร์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.22



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

ตารางที่ 4.22 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น	สารประกอบ
O-H	3398	H_2O,Phenol,Alcohol
C-H	2913	Alkane
C=O	1700-1400	Ketone,Aldehyde
C=C	1600	Aromatic
C-O	1108	Ether,Carboxylic Acid

จากเทคนิค GC-MS H^1-NMR และ FT-IR ทำให้พบว่าน้ำมันชีวภาพมีส่วนประกอบเป็น ฟีนอล อโรมาติก และคีโตนเป็นส่วนใหญ่และยังพบองค์ประกอบของน้ำเล็กน้อย และจะเห็นได้ว่าน้ำมันชีวาพมีองค์ประกอบของกรดแอซิติก ทำให้น้ำมันชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นกรด และจากองค์ประกอบของคีโตนเป็นส่วนมากทำให้ร้อยละของออกซิเจนสูงขึ้นด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลองการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 สมบัติพื้นฐานของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

จากการวิเคราะห์แบบประมาณพบว่าขี้เลื่อยยูคาลิปตัสประกอบไปด้วยความชื้นร้อยล 11.48 ะโดยน้ำหนัก ขี้เถ้าร้อยละ 1.23 โดยน้ำหนัก คาร์บอนคงตัวร้อยละ 7.28 โดยน้ำหนัก และสารระเหยสูงถึงร้อยละ 80.01 โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่าขี้เลื่อยยูคาลิปตัสประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 45.03 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.42 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 5.35 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 49.20 โดยน้ำหนัก และซัลเฟอร์น้อยกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก

5.1.2 ค่าการสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

จากการศึกษาค่าการสลายตัวทางความร้อนของขี้เลื่อยยูคาลิปตัสพบว่าขี้เลื่อยยูคาลิปตัสนั้นมีค่าการสลายตัวสูงสุดที่ 360 องศาเซลเซียสและเหลือถ่านชาร์ร้อยละ 22 โดยน้ำหนักที่และอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

5.1.3 การวิเคราะห์หาธาตุโลหะหนักของขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

จากการวิเคราะห์พบธาตุโลหะสำคัญได้แก่ แมกนีเซียม โซเดียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส โพแตสเซียมและคลอไรด์ ซึ่งเป็นธาตุสำคัญในการเติบโตของพืชและส่วนใหญ่เป็นธาตุในหมู่อัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ท

5.1.4 ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

จากการทดลองโดยศึกษาผลของตัวแปรเดียวโดยให้อุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนคงที่ พบว่าที่ขนาดอนุภาค 0.5-0.85 มิลลิเมตรให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุด

5.1.5 ปัจจัย อุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน ที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

จากการออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับที่อุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200-600 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 0-200 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าจากการคำนวณของโปรแกรม design-expert ได้ภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 450.02 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200.33 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพาหรือแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ร้อยละ 51.88 โดยน้ำหนัก และจากการทดลองจริงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพาหรือแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือร้อยละ 52.67 โดยน้ำหนัก

5.1.6 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนน้ำมันเบาต่อน้ำมันหนักอยู่ที่ 5.7:4.3 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุพบว่ามีค่าน้ำมันเบาประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 11.27 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 9.83 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 78.89 โดยน้ำหนักและน้ำมันหนักคาร์บอนร้อยละ 52.66 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.87 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 6.3 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 40.80 โดยน้ำหนัก และพบค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ 28.05 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

5.1.7 สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ

ในการศึกษาสมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพได้ทำการวิเคาะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) โปรตรอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (H-NMR) และแก๊สโครมาโตกราฟ- แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) พบว่าน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของทั้งสารประกอบของหมู่ออกซิเจน (Oxygen containing compounds) และกลุ่มไฮโดรคาร์บอน

จะเห็นได้จากพีคของ O–H, C=O, C-H โดยสารประกอบของหมู่ออกซิเจนได้แก่ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน เอสเทอร์และกลุ่มไฮโดรคาร์บอน จะเห็นได้จากพีคของ C-H, C=C,C-H ซึ่งได้แก่ อะโรมาติก แอลเคน แอลคีน และจากการวิเคราะห์ชนิดของโปรตอนของน้ำมันชีวภาพ พบว่ามีหมู่อะโรมาติกที่ตำแหน่ง 6.39-7.26 ที่ร้อยละ 19.03 ของไฮโดรเจน ที่ตำแหน่ง 3.48-4.91 พบหมู่อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับออกซิเจนที่ร้อยละ 28.83 ของไฮโดรเจน ที่ตำแหน่ง 2.08-2.58 พบหมู่อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับกลุ่มอะโรมาติกและแอลคีนสูงที่สุดที่ร้อยละ 40.02 ของไฮโดรเจนและที่ตำแหน่ง 0.80-1.25 พบหมู่อะลิฟาติกที่ตัวอื่นที่ร้อยละ 12.12 ของไฮโดรเจน และศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันชีวภาพนั้นประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน ไฮดรอกซี และคาร์บอกซิล เช่นกลุ่มคีโตน ฟีนอล และแอลกอฮอล์ ซึ่งฟีนอลเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ- แมสสเปกโตรเมทรีนี้ ส่งผลให้น้ำมันชีวภาพมีร้อยละของออกซิเจนที่สูงและมีค่าความเป็นกรดกับความหนืดที่สูงและไม่เสถียรเมื่อได้รับความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ระบบไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องในส่วนของตัวแยกถ่านชาร์นั้นมีน้ำมันชีวภาพติดอยู่จำนวนหนึ่งเนื่องมาจากอุณหภูมิของตัวเก็บสารนั้นอยู่ที่อุณหภูมิห้องทำให้น้ำมันหนักที่มีจุดเดือดสูงเกิดการกลั่นตัวได้เร็วจึงทำให้มีน้ำมันส่วนหนึ่งเกาะติดบริเวณนี้ และสามารถแก้ไขได้โดยการทำให้ตัวเก็บสารนี้มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับตัวเครื่องปฏิกรณ์จะทำให้น้ำมันไม่เกาะติดตัวเก็บสาร
- น้ำมันชีวภาพที่ได้จะประกอบไปด้วยน้ำมันเบา น้ำมันหนักและน้ำ จึงจำเป็นต้องกลั่นแยกองค์ประกอบของทั้ง 3 ส่วนออกจากกันก่อน จึงจะสามารถนำน้ำมันชีวภาพที่ได้ไปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงต่อไป
- น้ำมันชีวภาพที่ได้มีความเป็นกรดสูงและมีค่าร้อยละของออกซิเจนที่สูงจึงต้องนำน้ำมันชีวภาพไปทำการปรับสภาพให้มีค่าความเป็นกรดและร้อยละของออกซิเจนลดลงก่อนที่จะนำไปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงต่อไป
- ถ่านชาร์ที่ได้จากระบบสามารถนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อให้เกิดเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีพลังงานความร้อนสูงได้
- ปริมาณแก๊สที่ออกมาจากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นไม่ก่อให้เกิดมลพิษเนื่องมาจากในขี้เลื่อยของยูคาลิปตัสมีปริมาณไนโตเจนและซัลเฟอร์ที่น้อยทำให้ไม่เกิดแก๊สมลพิษและแก๊สที่เกิดขึ้นสามารถวนกลับมาเป็นเชื้อเพลิงให้เตาปฏิกรณ์ได้
- ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถไปขยายผลในเชิงพาณิชย์ และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้เนื่องจากเศษไม้เหลือใช้ในประเทศไทยมีจำนวนที่มาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. ปิโตรเลียม. Available from: http://th.wikipedia.org/wiki/ปิโตรเลียม.
2. ชีวมวล. Available from: http://www.espthailand.com/article/benefits-of-biomass.html.
3. เทคโนโลยี พลังงานชีวมวล. Available from: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=127&Itemid=121&lang=th.
4. ตันตยานนท์, ศ., ปิโตรเคมี. 2535, กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. Matar, S., *Chemistry of Petrochemical Processes*. 1994, Texas.
6. การเกิดปิโตรเลี่ยม. Available from: http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1589-การเกิดปิโตรเลียม.
7. พลังงานทดแทน. Available from: http://th.wikipedia.org/wiki/พลังงานทดแทน.
8. ศักยภาพของชีวมวล. Available from: www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Thai/Part-2_T.pdf.
9. เซลลูโลส. Available from: archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/biol0352sk_ch2.pdf.
10. ลิกนิน. Available from: archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/biot0352at_ch2.pdf.
11. พลังงานชีวมวล. Available from: http://www.energyvision.co.th/14424507/พลังงานชีวมวล.
12. Yang, H. and H. Chen, *11 - Biomass gasification for synthetic liquid fuel production*, in *Gasification for Synthetic Fuel Production*, R.L.G. Speight, Editor. 2015, Woodhead Publishing. p. 241-275.
13. Abnisa, F. and W.M.A. Wan Daud, *A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil.* Energy Conversion and Management, 2014. **87**(0): p. 71-85.
14. Bridgwater, A.V., *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading.* Biomass and Bioenergy, 2012. **38**(0): p. 68-94.
15. ทิพยาวงศ์, ร.ด.น., เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. 2552.

16. Fagbemi, L., L. Khezami, and R. Capart, *Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar.* Applied Energy, 2001. **69**(4): p. 293-306.

17. Liaw, S.-S., et al., *Effect of pyrolysis temperature on the yield and properties of bio-oils obtained from the auger pyrolysis of Douglas Fir wood.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012. **93**(0): p. 52-62.

18. สุดสุข, น., น.ส.ศ. เกียรติพึ่งพร, and ร.ด.อ. ดวงจันทร์, *Pyrolysis of Palm Fibre, Coffee Husk and Eucalyptus Wood.*

19. Guerrero, M., et al., *Pyrolysis of eucalyptus at different heating rates: studies of char characterization and oxidative reactivity.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2005. **74**(1–2): p. 307-314.

20. Chen, D., J. Zhou, and Q. Zhang, *Effects of heating rate on slow pyrolysis behavior, kinetic parameters and products properties of moso bamboo.* Bioresource Technology, 2014. **169**(0): p. 313-319.

21. Zhou, S., et al., *Effect of particle size on the composition of lignin derived oligomers obtained by fast pyrolysis of beech wood.* Fuel, 2014. **125**(0): p. 15-19.

22. Jin, H., et al., *Leaching of heavy metals from fast pyrolysis residues produced from different particle sizes of sewage sludge.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014. **109**(0): p. 168-175.

23. Basile, L., et al., *Influence of pressure on the heat of biomass pyrolysis.* Fuel, 2014. **137**(0): p. 277-284.

24. Luo, G. and F.L.P. Resende, *Fast pyrolysis of beetle-killed trees.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, (0).

25. Jiang, H., et al., *Pyrolysis kinetics of spent lark mushroom substrate and characterization of bio-oil obtained from the substrate.* Energy Conversion and Management, 2014. **88**(0): p. 259-266.

26. Lee K.H., K.B.S., Park Y.K. and Kim JS, *Influence of reaction temperature,pre-treatment,and char removal system on the production of bio-oil from rice strew by fast pyrolysis, using a fluidized bed.* Energy & Fuels, 2005(19): p. 2179-2184.

27. Kim, S.W., *Prediction of product distribution in fine biomass pyrolysis in fluidized beds based on proximate analysis.* Bioresource Technology, 2015. **175**(0): p. 275-283.

28. Jung, S.H., Kang,B.S. and Kim,J.S., *Production of bio-oil rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and char separation system.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2008(82): p. 240-247.

29. Zheng, J.-l., W.-m. Yi, and N.-n. Wang, *Bio-oil production from cotton stalk.* Energy Conversion and Management, 2008. **49**(6): p. 1724-1730.

30. Lu, Q., X.-l. Yang, and X.-f. Zhu, *Analysis on chemical and physical properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2008. **82**(2): p. 191-198.

31. โต๊ะทอง, ร., การผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง, in เคมีเทคนิค. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.

32. เรืองวิไลรัตน์, พ., การผลิตน้ำมันชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าโดยไพโรไลซิสในบรรยากาศไนโตรเจนและไอน้ำ, in เคมีเทคนิค. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.

33. ธนกิจธรรมกุล, น., การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว, in เคมีเทคนิค. 2553, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.

การหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

แก๊สโครมาโทกราฟี (GC) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครมาโทกราฟี ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะมีความสามารถแยกและวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบที่หลาหลายได้ และยังให้ผลแม่นยำและรวดเร็ว แก๊สโครมาโทกราฟีมีเทคนิคในการวิเคราะห์ 2 วิธี คือ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของแข็งเรียกว่า “gas-solid chromatography” (GSC) และการใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของเหลวเรียกว่า “gas-liquid chromatography” (GLC) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีเฟสเคลื่อนที่ได้เป็นแก๊ส เทคนิคทั้งสองได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยที่เทคนิคของ GLC เป็นที่นิยมกันมากกว่าแก๊สโครมาโทกราฟีใช้ได้กับสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ณ อุณหภูมิของคอลัมน์เท่านั้น ดังนั้นวิธีการของแก๊สโครมาโทกราฟีจึงเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น เพราะ สารประกอบอินทรีย์สามารถกลายเป็นแก๊สได้ง่ายจะไม่ใช้วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับการวิเคราะห์สารประกอบอนินทรีย์ เพราะสารประกอบอนินทรีย์ไม่สามารถกลายเป็นแก๊สได้ใน อุณหภูมิปกติ (ที่ทำการทดลอง) ของคอลัมน์วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งทางคุณภาพและทางปริมาณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. แก๊สที่ใช้งานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ มี 3 ชนิด คือ

1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สพา (Carrier Gases) เพื่อจะใช้พาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์

1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)

1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID

2. Gas Traps และ Filters เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและ บริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น Cartrige คือ

2.1 Molecular Sieve Trap ใช้ดูดความชื้น

2.2 Oxygen Trap เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน

2.3 Hydrocarbon Filter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมันสำหรับ แก๊สตัวพาควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter

3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ

5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจาก ทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้ำไร้ สนิม อำจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มม. อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการแยก สารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพนอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดรูเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม. แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

5.1 Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลวเคลือบเป็นฟิล์ม บางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร

5.2 Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ หรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร

5.3 Micropacked Column คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร

6. Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้แตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมี ขั้ว ไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ตัวตรวจวัดชนิด FID นี้เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.

การออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ

การออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ

การออกแบบเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ นิยมใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัย ซึ่งต้องการที่จะศึกษาผลรวมที่มีต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วยสองระดับ แต่ละระดับเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่นความดัน อุณหภูมิ ปริมาณสารตั้งต้น หรือเวลา เป็นต้น หรือเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพได้ เช่นอุปกรณ์ เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และในสองระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2×2×...×2 = 2k และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k หรือการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรกเมื่อมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้ทำให้เกิดการทดลองลดจำนวนลงเพื่อที่สามารถศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ดังนั้น จึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้ลดน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียลประกอบด้วย 2 ระดับ ผลที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานสามารถยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อใช้ปัจจัยทำการศึกษาระบบ

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับเป็นการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับชนิดแรก คือการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2k ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “สูง” และ “ต่ำ” การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบสามารถแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A,B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย + และ - บนแกน A และ B ตามลำดับการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย สำหรับการออกแบบจะแทนด้วยตัวอักษรเล็กจะเห็นได้ว่าสำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆจะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น สำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฎตัวอักษรใดๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้นสำหรับ

การออกแบบ 2k ในที่นี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ, b แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ab แทนทั้ง ปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1) แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

สมการในการคำนวณ

Contrast เท่ากับผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment คูณกับสัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

$$\text{Effect Estimate}_{\text{AB…K}} = \frac{2(\text{Contrast}_{\text{AB…K}})}{n2^k}$$

$$Sum\ of\ Squares_{AB\ldots K}\ :\ SS_{AB\ldots K} = 2\ (\text{Contrast}_{\text{AB…K}})^2$$

$$Total\ of\ sum\ of\ squares : SS_T = \frac{\sum_{i=1}\sum_{j=1}\sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \ldots}{N}$$

$$Mean\ of\ Square\ Error :\ SSE = SST - sum\ Squares\ of\ Main\ Effect$$

$$Mean\ of\ Square :\ MS = \frac{Sum\ of\ Square}{Degree\ of\ Freedom}$$

$$\%\ Normal\ probability = \frac{(Cumulative\ frequency - 0.5) \times 100}{Total\ cumulative\ frequency}$$

$$F_0 = p - value = \frac{Mean\ Square\ of\ Effect}{Mean\ Square\ of\ error}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศิวัช ภู่ระหงษ์ เกิดวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ กาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2552 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University