การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว

นายกีรติณัฏฐ์ ธนกิจธรรมกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5 1 7 2 5 5 8 2 2 3

BIO-OIL PRODUCTION FROM RICE STRAW BY FAST PYROLYSIS

Mr. Keeratinat Thanakijtummakul

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว
โดย	นาย กีรติณัฏฐ์ ธนกิจธรรมกุล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กีรติณัฏฐ์ ธนกิจธรรมกุล : การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว. (BIO-OIL PRODUCTION FROM RICE STRAW BY FAST PYROLYSIS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 119หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการไพโลซิสแบบเร็วจากฟางข้าว โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์และน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และอัตราการป้อนสาร อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 350 - 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคอยู่ที่ 0.250 - 0.85 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 0 - 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 1.76 - 2.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดอยู่ที่ 53.83 ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.450 - 0.600 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ อัตราการป้อนสารที่ 2.11 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยองค์ประกอบทางด้านเคมีของน้ำมันชีวภาพจะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโทรเมตรี (GC/MS) และทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ ผลจากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนในขณะที่ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งสามารถนำมาใช้แปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ในกระบวนการดูดซับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....กีรติณัฏฐ์ ธนกิจธรรมกุล.....
สาขาวิชา...เทคโนโลยีเชื้อเพลิง...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2553.....

517 25582 23 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS : RICE STRAW / BIO-OIL / PYROLYSIS

KEERATINAT THANAKIJTUMMAKUL : BIO-OIL PRODUCTION FROM RICE STRAW BY FAST PYROLYSIS. THESIS ADVISOR: Assoc. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 119 pp.

The fast pyrolysis of rice straw was studied to estimate the effect of pyrolysis conditions on product yields and bio-oil composition of pyrolysis, while temperature, particle size, nitrogen flow rate and feed rate were the experimental parameters. The parameters investigated were pyrolysis temperature between 350 ºC - 600 ºC, particle sizes range of 0.250 - 0.85 mm diameter, nitrogen-flow rates between 0 - 200 cm^3 /min, and feed rate of rice straw from 1.76 - 2.3 kg/hr. The results show the maximum liquid product yield of 53.83 wt.% at pyrolysis temperature of 450 ˚C, particle sizes of $0.450 < D_p < 0.600$ mm, nitrogen-flow rates rate of 200 cm^3 /min, and feed rate of rice straw of 2.11 kg/hr. The Chemical composition of the bio-oil acquired was analyzed by GC-MS and physical properties of bio-oil. According to the experimental results the liquid products can be used as a potential source of renewable fuel, whereas the solid products can be transformed to activated carbon using in adsorption process.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Chemical Technology Student's Signature Keeratinat Thanakijtummakul

Field of Study : Fuel Technology Advisor's Signature T. Vitidsant

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยดูแลและคอยให้คำชี้แนะให้คำแนะนำที่มีประโยชน์กับงานวิจัยและ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอบคุณ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่สนับสนุนเครื่องมือวิเคราะห์และค่าบริการในการวิเคราะห์ผลการวิจัย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ อาจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณามาสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความดูแลและคอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีทั้งด้านงานวิจัยและการเรียน

ขอขอบคุณ คุณณภาภัช ไชยทรัพย์อนันต์ พี่ๆ เพื่อนๆน้องๆในห้อง CT330 และในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจอยู่เสมอ

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ คอยมอบความรักความเป็นห่วงเป็นใย ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน และสนับสนุนข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมาจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 3

1.4 ขั้นตอนการวิจัย..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 ชีวมวล..... 5

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของชีวมวล..... 6

2.1.2 ชีวมวลในประเทศไทย..... 8

2.2 สมบัติของชีวมวล..... 11

2.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล..... 11

2.2.2 ส่วนประกอบของชีวมวล..... 16

2.3 พืชชีวมวล..... 18

2.3.1 แกลบ..... 18

2.3.2 ชานอ้อย..... 19

2.3.3 กากปาล์ม..... 20

2.3.4 เศษไม้..... 20

2.3.5 ซังข้าวโพด..... 21

2.3.6 เศษวัสดุเหลือใช้จากมันสำปะหลัง..... 22

2.3.7 ผักตบชวา..... 22

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

2.3.8 ฟางข้าว..... 23
2.4 ค่าความร้อน..... 24
2.5 ปริมาณความชื้น..... 25
2.6 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ..... 26
2.7 ส่วนประกอบของเศษเถ้า..... 27
2.8 การแปรรูปชีวมวล..... 27
2.8.1 การเผาไหม้ (Combustion)..... 28
2.8.2 ลิควิแฟกชัน (Liquefaction)..... 29
2.8.3 แกซิฟิเคชัน (Gasification)..... 30
2.8.4 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)..... 30
2.9 กระบวนการไพโรไลซิส..... 30
2.9.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส..... 33
2.9.2 กลไกการไพโรไลซิส..... 35
2.10 ผลกระทบตัวแปรต่างๆต่อการไพโรไลซิส..... 42
2.11 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส..... 45
2.12 การผลิตน้ำมันชีวภาพ..... 47
2.13 การผลิตถ่านชาร์..... 51
2.14 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์..... 55
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 59
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง..... 64
3.1 เครื่องมือ..... 64
3.2 สารตัวอย่างและสารเคมี..... 70
3.3 วิธีการทดลอง..... 70
3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองของผลิตภัณฑ์..... 72
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 73
4.1 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของฟางข้าว..... 73
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ..... 73
4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของฟางข้าวด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก..... 74
4.1.3 การวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฟางข้าวด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์..... 75

บทที่ หน้า

4.2 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิส 76
4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ 77
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ 78
4.2.3 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80
4.2.4 ผลของอัตราการป้อนสาร 81
4.3 ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์เหลว 83
4.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส 84
4.4.1 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ 84
4.4.2 ค่าความร้อนของถ่านชาร์ 85
4.4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ 85
4.4.4 สมบัติพื้นฐานต่างๆของน้ำมันชีวภาพ 86
4.5 การทดสอบองค์ประกอบทางด้านเคมี 89
4.5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี 89
4.5.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโครปี 91
4.5.3 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี 92
4.5.4 วิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปกโตรเมทรี 93
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 96
5.1 สรุปผลการทดลอง 96
5.2 ข้อเสนอแนะ 98
รายการอ้างอิง 100
ภาคผนวก 105
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง 106
ภาคผนวก ข การคำนวณ 114
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ 115
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 119

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	รายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และไม้ยางพารา…….……..	9
2.2	ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทยปี 2550/2551…….……	10
2.3	การใช้ชีวมวลในประเทศไทยระหว่างปี 2546 – 2551……..…….	11
2.4	ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน…….	12
2.5	ลักษณะทางกายภาพของผลิตผลทางการเกษตร……..……..	26
2.6	ลักษณะทางเคมีของผลิตผลทางการเกษตร……..……...	27
2.7	องค์ประกอบของแก๊สเมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ…….……..	32
2.8	ลักษณะของกระบวนการที่สำคัญของไพโรไลซิส……	35
2.9	ปฏิกิริยาคายความร้อนของเซลลูโลส……	37
2.10	ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ……	48
2.11	สมบัติด้านเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพ…….	49
2.12	สมบัติทั่วไปของน้ำมันดิบชีวภาพจากไม้เปรียบเทียบกับน้ำมันเตา……..….	49
4.1	การวิเคราะห์แบบประมาณ……...	73
4.2	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ……	74
4.3	การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆในฟางข้าวด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์……...	76
4.4	ผลการปรับเทียบความสัมพันธ์ของความเร็วของสกรูกับอัตราการป้อนสาร……	81
4.5	ร้อยละอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก…….……...	83
4.6	ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ……..……...	84
4.7	ค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ…….……	85
4.8	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพ……..	86
4.9	ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าว……	87
4.10	องค์ประกอบของแก๊สที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆในกระบวนการไพโรไลซิส……...	90
4.11	องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพของฟางข้าวจากกระบวนไพโรไลซิส…	91
4.12	ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี…….....	92
4.13	องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสฟางข้าวโดย GC-MS……..…….	94
ค.4	การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าวด้วยเทคนิค GC……	118

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวล (เซลลูโลส(Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin))……..	11
2.2	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส……	12
2.3	สูตรโครงสร้างการจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลส……	13
2.4	ไมโคลไฟบริลในเซลลูโลส……..	13
2.5	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส……..	14
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน……	15
2.7	แกลบ…….....	19
2.8	ชานอ้อย…….....	20
2.9	กากปาล์ม……...	20
2.10	เศษไม้……	21
2.11	ซังข้าวโพด……	21
2.12	เหง้ามันสำปะหลัง……...	22
2.13	ผักตบชวา……	23
2.14	ฟางข้าว……...	23
2.15	ปริมาณฟางข้าวในภูมิภาคต่างๆ ปี พ.ศ. 2552……	24
2.16	โครงสร้างเคมีของฟางข้าว……..	24
2.17	กระบวนการแปรรูปทางความร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้……...	28
2.18	กระบวนการแตกตัวทางความร้อนของชีวมวล……..	31
2.19	ปริมาณผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสไม้แบบเร็ว……..	34
2.20	กลไกสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ……..	36
2.21	การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลาง…….	37
2.22	กลไกการแตกตัวขององค์ประกอบชีวมวล…….	38
2.23	การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง……	38
2.24	การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน……	40
2.25	การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิดในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ…	41
2.26	การนำน้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวลไปใช้ประโยชน์……	51

ภาพประกอบ หน้า

2.27 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของถ่านชาร์..... 54
2.28 ผลของความดันและการไหลของก๊าซต่อการเกิดถ่านชาร์..... 55
2.29 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ..... 56
2.30 เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน..... 56
2.31 เครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ..... 57
2.32 เครื่องปฏิกรณ์แบบแอบลาทีฟ..... 58
2.33 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน..... 58
3.1 เครื่องมือในการเตรียมสารตัวอย่าง..... 65
3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง..... 67
3.3 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง..... 67
3.4 เครื่องThermogravimetric/Differential Thermal Analyzer..... 68
3.5 เครื่อง Gas Chromatography..... 68
3.6 เครื่องมือวิเคราะห์ความหนืด..... 69
3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟกับแมสเปกโทรมิเตอร์..... 69
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TG) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของฟางข้าว..... 75
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์..... 77
4.3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์..... 79
4.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์..... 80
4.5 ผลของอัตราการป้อนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์..... 82
4.6 การแยกเฟสของน้ำมันหนักและน้ำมันเบา..... 83
4.7 ตัวอย่างของน้ำมันชีวภาพที่จากกระบวนการไพโรไลซิส..... 84
4.8 ค่ากัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าว..... 89
4.9 ปริมาณร้อยละขององค์ประกอบของแก๊สที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆในกระบวนการไพโรไลซิส..... 90
4.10 องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพของฟางข้าวจากกระบวนไพโรไลซิส..... 92
4.11 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี... 93
4.12 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวจากแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโครปี 94

ภาพประกอบ หน้า

ค.1 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบต่าง ๆ ของ น้ำมันชีวภาพด้วย GC/MS……... 113
ค.2 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบต่าง ๆ ของ น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิค FTIR……... 114
ค.3 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบต่าง ๆ ของ น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR…….. 115
ค.4 การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าวด้วยเทคนิค GC…….. 118

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำมันเชื้อเพลิงถือได้ว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์และถูกจัดให้เป็นยุทธปัจจัยที่สำคัญ ซึ่งปัจจุบันมีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณมาก เป็นผลมาจากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม เทคโนโลยี เพื่อตอบสนองต่อความต้องการขั้นพื้นฐานของมนุษย์ที่มีเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้น จึงมีความจำเป็นในการจัดเตรียมแหล่งพลังงานอื่นๆมาทดแทน

ชีวมวล เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้ เป็นแหล่งพลังงานประเภทหนึ่ง คือ พลังงานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การสังเคราะห์แสงของพืชจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำไปเป็นสารอินทรีย์ต่างๆที่สามารถเผาไหม้ได้ องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวล คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides)

กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพกระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แกซิฟิเคชัน (Gasification) ลิควิแฟกชัน (Liquefaction) และการเผาไหม้ (Combustion) โดยไพโรไลซิสเป็นกระบวนการให้ความร้อนในภาวะที่ไม่มีอากาศหรือออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊ส น้ำมันทาร์ และถ่านชาร์โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน เวลาและชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ การไพโรไลซ์ที่อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูง จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นผลิตภัณฑ์หลัก แก๊สที่ได้ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ

ฟางข้าว (Rice straw) เป็นผลิตผลที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวข้าวของเกษตรกร ข้าว (Rice) เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้าที่สามารถกินเมล็ดได้ ถือเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่นเดียวกับหญ้า ฟางข้าวส่วนใหญ่จะเป็นส่วนลำต้นของต้นข้าวที่มีการคัดเอาเมล็ดข้าวออกไปแล้วจากกระบวนการเก็บเกี่ยว ฟางข้าว เป็นอินทรีย์วัตถุที่มีประโยชน์สูง ฟางข้าวจำนวน 1 ตัน เมื่อหมักแล้วจะได้ธาตุอาหารทั้งธาตุหลักและธาตุรอง ดังนี้คือ ไนโตรเจน (N) 6 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส (P_2O_5) 1.4 กิโลกรัม โพแทสเซียม (K_2O) 17 กิโลกรัม แคลเซียม (Ca) 1.2 กิโลกรัม แมกซีเซียม (Mg) 1.3

กิโลกรัม และที่สำคัญคือได้ธาตุซิลิกา (SiO_2) จำนวน 50 กิโลกรัม ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปีและนาปรังหนึ่งมากว่า 70 ล้านไร่ และผลิตข้าว ปีละไม่ต่ำกว่า 21 – 25 ล้านตัน และมีวัสดุเหลือที่เรียกว่าฟางข้าวและตอซังข้าว ประมาณ 3 เท่าของเมล็ดข้าว เมื่อคำนวณพบว่าจะได้ปริมาณฟางข้าวและตอซังข้าวถึง 50-70 ล้านตัน จากจำนวนข้าวที่ผลิตได้ดังกล่าว ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย (คิดเป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่า 30,000 ล้านบาท) แต่ฟางข้าวจำนวนมหาศาลที่ได้นี้แทบจะไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์

ฟางข้าวมีองค์ประกอบหลักที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 30-35% เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ประมาณ 25-30% และ ลิกนิน (Lignin) ประมาณ 8-12% โดยมีพันธะไฮโดรเจนและพันธะเอสเทอร์ยึดติดกันไว้ เถ้า (Ash) 12-20% และน้ำ 13-17% ซึ่งจากการที่ฟางข้าวมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทำให้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการ ศึกษาเกี่ยวกับการไพโรไลซิสของเสียที่เกิดจากการเกษตร (ซังข้าวโพด, ฟางข้าวและต้นกระเพรา) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูไดซ์เบด ได้ปริมาณของชาร์ ของเหลว และแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ของการไพโรไลซิสจะแยกออกเป็น 2 สถานะได้แก่ สถานะที่เป็นน้ำ และน้ำมัน ปริมาณน้ำมันที่ได้มีค่าประมาณ 35 – 41 % ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลแต่ละชนิด และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์โครมาโทรกราฟฟี – แมสสเปกโทรเมทรี (Chromatography – mass spectrometry) นอกจากนี้ ยังสามารถสามารถวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของน้ำมัน องค์ประกอบทางเคมีของแก๊สและผลิตภัณฑ์ชาร์ที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ได้

งานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการเผากากของเสียโดยใช้ความร้อนสูงในระยะเวลาหนึ่ง โดยไม่ใช้ออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซ ไฮโดรคาร์บอน) ของเหลว (สารละลายอินทรีย์ และน้ำมันดิน (tar)) และของแข็ง (ถ่าน) ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่ กับชนิดของมวลชีวภาพและวิธีการให้ความร้อน ในการสังเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากฟางข้าว ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นลิกโนเซลลูโลสและสารระเหยสูงนั้น เป็นการเพิ่มคุณค่าและมูลค่าในเชิงเศรษฐกิจให้แก่ฟางข้าว ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรที่เหลือใช้ให้สามารถก่อให้เกิดประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนในสถานการณ์ที่มีปัญหาด้านน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมีปริมาณลดน้อยลงหรือสามารถนำเอาผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมผลิตภัณฑ์ทางเคมีต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรและภาวะที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าว
2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าวเพื่อใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพ

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมฟางข้าวแห้งบดละเอียด นำไปร่อนแยกขนาดในตะแกรงร่อนเพื่อแยกให้ได้ขนาดของอนุภาคฟางข้าวในช่วง 0.250 – 0.850 มิลลิเมตร เตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
3. วิเคราะห์สมบัติของฟางข้าวก่อนทำการทดลอง
   - องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) : ASTM 3172, 3173, 3174 และ 3175 เพื่อหาค่าความชื้น เถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว
   - องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) : ASTM D3176
   - ปริมาณค่าความร้อน (Gross Calorific Value) : ASTM D 2015
   - การสูญเสียน้ำหนักเมื่อให้ความร้อนด้วยเทอร์โมกราวิเมทริก/ดิฟเฟอร์เรนเชียลเทอร์มัลอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer: TGA)
4. ไพโรไลซิสฟางข้าวในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยมีตัวแปรดังนี้
   - อัตราการป้อนสารตัวอย่าง (ฟางข้าว)
   - อุณหภูมิ 350 - 600 องศาเซลเซียส
   - อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
   - ขนาดอนุภาคของสารตัวอย่าง (ฟางข้าว)
5. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้
   - วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทรกราฟี-แมสสเปกโทรเมทรี (Gas Chromatography-Mass spectrometry, GC-MS)
   - วิเคราะห์องค์ประกอบและค่าความร้อน
   - วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (Gross Calorific Value) : ASTM D 2015
   - วิเคราะห์ค่าพลังงานในกระบวนการไพโรไลซิส
6. วิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางกายภาพ
   - จุดวาบไฟของน้ำมันชีวภาพตามมาตรฐาน ASTM D 93
   - ความหนืดของน้ำมันชีวภาพด้วยมาตรฐาน ASTM D 45
   - ค่าความเป็นกรด-เบสด้วย pH meter
7. วิเคราะห์ และ สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว
2. ได้น้ำมันชีวภาพที่มีองค์ประกอบและสมบัติที่สามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมผลิตภัณฑ์ทางเคมีต่อไป
3. ได้ข้อมูลและต้นแบบในการผลิตเพื่อที่จะนำไปขยายต่อในระดับเชิงพาณิชย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (Biomass)

ในพจนานุกรมของราชบัณฑิตยสถานไม่ได้ระบุความหมายชีวมวลไว้ ชีวมวลแปลมาจากศัพท์ภาษาอังกฤษว่า “Biomass” ประกอบด้วยคำสองคำคือ ชีว และ มวล ชีวคือสิ่งมีชีวิตเช่นมนุษย์ พืชและสัตว์ มวลคือวัตถุสิ่งของต่างๆ ดังนั้นชีวมวล (Biomass) หมายถึงสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต (ยกเว้นที่ได้กลายเป็นเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติไปแล้ว) และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งนี้อาจจะสามารถจำแนกแหล่งที่มาของชีวมวลได้ 3 แหล่งดังนี้

<u>ประเภทแรก</u> ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร เช่น

- แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก
- ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย
- เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้
- กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด
- กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง
- ซังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก
- กากและกะลามะพร้าว ได้จากกากนำมะพร้าวมาปลอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไป ผลิตกะทิ และน้ำมะพร้าว เป็นต้น

<u>ประเภทสอง</u> ชีวมวลที่หาได้จากตามไร่ สวนและนาข้าว อาทิเช่น

- ฟางข้าวอยู่ในนาข้าว
- ปลายไม้ และรากไม้หรือตอไม้ยางพาราอยู่ในสวนยางพารา
- เหง้ามันสำปะหลังอยู่ในไร่มันสำปะหลัง
- ทางปาล์มหรือใบปาล์มอยู่ในสวนปาล์มน้ำมัน

<u>ประเภทสาม</u> ชีวมวลที่ปลูกใหม่เพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะ เช่น ยูคาลิปตัส เพื่อนำไม้ไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืชนั้นได้มีการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็จะได้พลังงานออกมา **[1]**

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกออกได้ 4 ประเภท ตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

1. **พืชผลทางด้านการเกษตร (Agricultural crops)** เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไอไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้
2. **เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (Agricultural residues)** เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ซังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง
3. **ไม้และเศษไม้ (Wood and wood residues)** เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์ เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น
4. **ของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน (Waste streams)** เช่น กากน้ำตาล และชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลแกลบขี้เลื่อยเส้นใยปาล์มและกะลาปาล์ม **[2]**

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมนั้นสามารถจำแนกได้ 2 เทคโนโลยีหลักๆ คือ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (Biochemical conversion process) และ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน (Thermochemical conversion process) โดยที่กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้อีก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเผาไหม้ กระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการแกซิฟิเคชัน ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการดำเนินการและวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของชีวมวล

ภาพรวมของพลังงานชีวมวล ประมาณร้อยละ 12 ของพลังงานของโลกมาจากพลังงานชีวมวล เช่น ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์และพืชให้พลังงานบางชนิด ในประเทศอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงเหล่านี้ได้ถูกนำมาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงงานกระดาษ และโรงงานน้ำตาล เป็นต้น ในขณะที่ประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งยังไม่มีประสิทธิภาพ และยังสร้างมลภาวะต่อ

สภาพแวดล้อม แต่การเพิ่มขึ้นของรายได้และอุตสาหกรรมเป็นตัวผลักดันให้มีการใช้เทคโนโลยีชีวมวลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสะอาดขึ้น

2.1.1.1 สรุปข้อดีข้อเสียการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. การเผาน้ำมันเตาและถ่านหินก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gas) จะทำให้โลกร้อนขึ้น แต่การเผาชีวมวลไม่ถือว่าก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจกโดยรวม เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้ใหม่ได้อีกครั้ง
2. การไม่นำชีวมวลมาใช้ เป็นการโดยปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ จะทำให้เกิดแก๊สมีเทนซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่ง และมีอันตรายกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 21 เท่า
3. ในชีวมวลจะมีกำมะถันหรือซัลเฟอร์ไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด (น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3-3.8 ซึ่งขึ้นกับประเภทของถ่านหิน)
4. ขี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นด่าง ดังนั้นเหมาะสมที่นำไปเพาะปลูก หรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก และซีเมนต์
5. การนำชีวมวลมาใช้ นอกจากจะก่อให้เกิดอันตรายได้แก่ผู้ผลิตชีวมวล ยังลดภาระในการกำจัด เช่น นำไปฝั่งกลบ หรือเผาทิ้ง เป็นต้น
6. ประหยัดเงินตราต่างประเทศเพราะลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเตาและถ่านหิน เป็นต้น
7. แปรรูปเป็นปุ๋ย โดยการนำเศษใบไม้ ใบหญ้าและฟางข้าว เป็นต้น มาหมักประมาณ 2-3 เดือน หรือปล่อยให้ย่อยสลายในสวน ในไร่ตามธรรมชาติก็ได้เช่นกัน
8. เป็นวัตถุดิบ เช่น การนำเศษไม้ยางพาราจากโรงเลื่อยมาย่อยและอัดเป็นแผ่นปาร์ติเคิลบอร์ดจากนั้นนำไปแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ
9. เพาะเห็ดจากขี้เลื่อย และทะลายปาล์มเปล่า
10. ใช้ในกิจกรรมปศุสัตว์ เช่น โรยแกลบให้โรงเลี้ยงไก่เพื่อรองรับมูลไก่ เป็นต้น

2.1.1.2 สรุปข้อเสียการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. ชีวมวลมีน้ำหนักเบา ถ้าขนส่งชีวมวลทางรถบรรทุก ต้องขนส่งจำนวนมาก ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้น ยังอาจมีผลกระทบต่อชุมชนในด้านการจราจร ความปลอดภัยในการใช้ถนน

2. เนื่องจากชีวมวลมีความชื้นสูง การออกแบบหม้อผลิตไอน้ำและปล่องไอเสียต้องมีขนาดใหญ่ตลอดจนถึงการติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นเพิ่มเติม ซึ่งทำให้เงินลงทุนมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าชีวมวลมีความชื้นสูง เป็นผลทำให้หม้อผลิตไอน้ำอาจทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ
3. ขี้เถ้าชีวมวลมีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงเกินไป จะทำให้ขี้เถ้าหลอมละลายติดในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีผลให้หม้อผลิตไอน้ำมีประสิทธิภาพลดลงและเกิดการอุดตัน
4. ชีวมวลบางประเภทมีส่วนผสมของอัลคาไลน์ ซึ่งจะกัดกร่อนท่อน้ำในหม้อผลิตไอน้ำ ดังนั้นในการออกแบบหม้อผลิตไอน้ำต้องคำนึงถึงจุดนี้ **[3]**

ถ้าพิจารณาในด้านเศรษฐศาสตร์ เชื้อเพลิงชีวมวลเสียเปรียบเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่หากพิจารณาเรื่องการทำลายภาวะแวดล้อมแล้ว เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อได้เปรียบกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลมีความหนาแน่นน้อยกว่า ให้พลังงานน้อยกว่า มีน้ำหนักเบากว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลและยากในการจัดการกว่า แต่เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีด้านสิ่งแวดล้อม คือ สามารถเกิดขึ้นหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร ไม่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (การเผาไหม้ของชีวมวลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกินกว่าที่พืชได้ดูดซับไว้ระหว่างการเจริญเติบโต) มีกำมะถันน้อยกว่า (จึงทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยกว่า) และอุณหภูมิเผาไหม้ต่ำกว่า (ช่วยลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้มากกว่า) นอกจากนี้การนำแหล่งวัตถุดิบที่มีอยู่ภายในประเทศมาใช้ จัดว่าเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและจากการสำรวจและประเมินศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าด้วยชีวมวลภายในประเทศ พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้ 700-1000 เมกกะวัตต์ หากพลังงานจาก ชีวมวลได้รับการพัฒนาให้นำใช้ประโยชน์อย่างจริงจังแล้ว ก็จะเป็นผลดีต่อประเทศโดยรวม

2.1.2 ชีวมวลในประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น ข้าว น้ำตาล มันสำปะหลัง ยางพารา และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ผลิตผลบางส่วนมีเหลือเพียงพอที่จะส่งออกไปยังต่างประเทศ สร้างรายได้ให้แก่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท จึงถือได้ว่าประเทศไทยเป็นครัวของโลก นอกจากนี้ระหว่างการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรเหล่านี้ก่อให้เกิดชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เศษไม้ยางพารา แกลบ ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง และกากอ้อย เป็นต้น ชีวมวลบางส่วนถูกนำไปแปรรูปเป็นปุ๋ย วัตถุดิบ และเชื้อเพลิง บางส่วนถูกเผา

ทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย ยอดอ้อย และรากไม้ยางพารา เป็นต้น พลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปีเทียบเท่าถ่านหินลิกไนต์ 54 ล้านตัน

ปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และไม้ยางพารา ปี 2549/2550 และ 2550/2551 (หน่วย: พันไร่ / พันตัน) **[4]**

	2549/50		**2550/51**	
ชนิด	**พื้นที่เก็บเกี่ยว**	**ผลผลิต**	**พื้นที่เก็บเกี่ยว**	**ผลผลิต**
อ้อย	6,314	64,365	6,588	73,501
ข้าว	67,610	29,640	66,950	29,900
ข้าวฟาง	208	57	205	55
ข้าวโพด	5,969	3,602	6,517	4,249
น้ำมันปาล์ม	2,663	6,613	2,873	9,264
มันสำปะหลัง	7,338	26,915	7,397	25,155
สับปะรด	597	2,305	581	2,278
ไม้ยางพารา	10,939	5,700	11,371	3,166

ศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นปริมาณชีวมวล ดังตารางที่ 2.2 พบว่าค่าปริมาณศักยภาพชีวมวลของไทยทั้งหมดมีปริมาณสูงถึง 158 ล้านตัน แต่มีการนำมาใช้งานในด้านเชื้อเพลิงเพียงแค่ 98 ล้านตัน ให้ค่าพลังงานประมาณ 1,499 ล้านจิกกะจูล โดยอ้อยเป็นชีวมวลที่มีปริมาณผลผลิตมากที่สุด และตารางที่ 2.3 แสดงการใช้ชีวมวลประเภทต่างๆในช่วง 2546-2551 พบว่าตั้งแต่ปี 2546-2551 ปริมาณของการใช้ชีวมวลในประเทศไทยมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยฟืนจะเป็นชีวมวลที่มีการใช้มากที่สุดมีปริมาณถึง 3,300 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ส่วนแกลบเป็นชีวมวลที่มีการใช้น้อยที่สุดอยู่ที่ 1,184 พันตันเทียบเท่า

น้ำมันดิบ ซึ่งการที่แกลบมีปริมาณการใช้ที่ต่ำอาจเป็นผลมาจากการที่แกลบจะมีองค์ประกอบของขี้เถ้าที่สูงซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านการเผาไหม้ชีวมวล

ตารางที่ 2.2 ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทยปี 2550/2551 **[5]**

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ค่าเปลี่ยนเป็นชีวมวล	ปริมาณชีวมวลที่ได้ (ตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	พลังงาน (GJ)	เทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe)	กำลังไฟฟ้า (MW)
อ้อย	73,501,000	ชานอ้อย	0.30	22,050,300	16.21	357,435,363	8,461	97.2
		ยอดและใบ	0.24	17,640,240	16.42	289,652,741	6,857	79
ข้าว	29,000,000	แกลบ	0.23	6,877,000	15.56	107,006,120	2,533	2.5
		ฟางข้าว	1.19	35,581,000	15.51	551,810,992	13,064	152.3
ข้าวโพด	4,249,000	ซัง	0.19	807,310	16.63	13,425,565	318	3.7
น้ำมันปาล์ม	9,264,000	ทะลายเปล่า	0.23	2,130,720	19.41	37,221,547	881	10.2
		กากใย	0.15	1,389,600	19.94	27,708,624	656	7.5
		กะลา	0.06	555,840	21.13	11,744,899	278	3.1
		ทางใบ/ก้าน	0.27	2,501,280	17.87	44,697,873	1,058	0.5
มันสำปะหลัง	25,155,000	ลำต้น	0.12	301,860	13.38	4,038,887	96	1
		เหง้า	0.10	251,550	10.61	2,668,945	63	0.6
ยางพารา	3,166,000	ขี้เลื่อย	0.03	940,980	16.65	1,581,417	37	0.3
		เศษไม้	0.01	316,600	16.85	5,334,710	126	1.3
ยูคาลิปตัส	6,800,000	ไม้ฟืน	0.20	1,360,000	16.85	22,916,000	542	6.2
		เปลือกไม้	0.1.	680,000	17.30	11,764,000	278	3.1
ไม้จากสวนป่า	6,000,000	เศษไม้	0.10	600,000	16.85	10,110,000	239	2.6
รวม	158,035,000			98,118,970		1,499,168,000	35,488	363.4

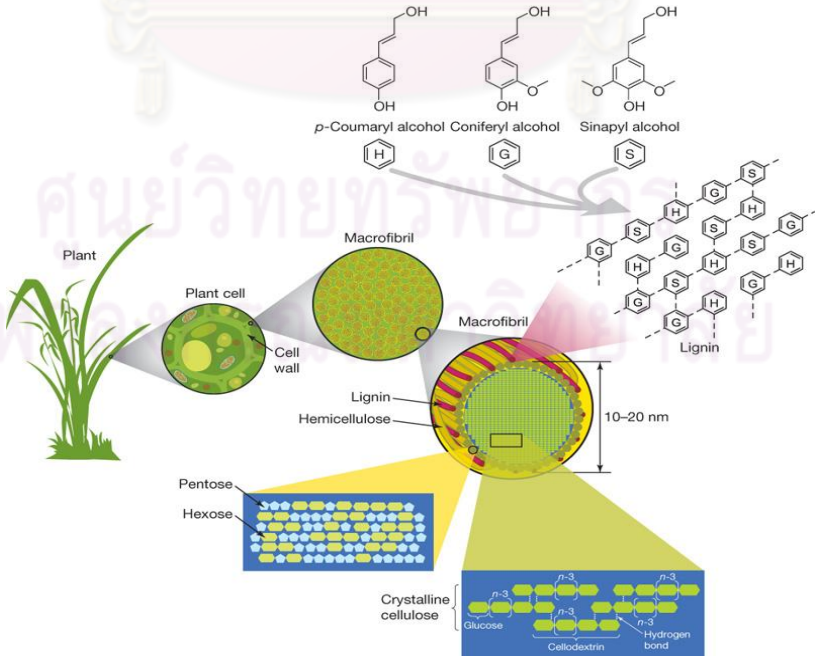
ตารางที่ 2.3 แสดงการใช้ชีวมวลในประเทศไทยระหว่างปี 2546 – 2551 (หน่วย: พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ) **[6]**

ชนิด	2546	2547	2548	2549	2550	2551
ฟืน	3,493	3,693	3,452	3,372	3,237	3,300
ถ่าน	2,357	2,608	2,698	2,807	2,932	3,095
แกลบ	996	1,073	1,084	998	1,043	1,184
กากอ้อย	2,905	2,949	2,866	2,435	2,636	2,818
วัสดุเหลือใช้	-	188	724	1,381	1,797	1,848
รวม	9,751	10,511	10,100	10,993	11,645	12,245

2.2 สมบัติของชีวมวล

2.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งชีวมวลแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณขององค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและภาวะการเจริญเติบโตของพืชนั้นๆ



รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวล (เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin)) **[7]**

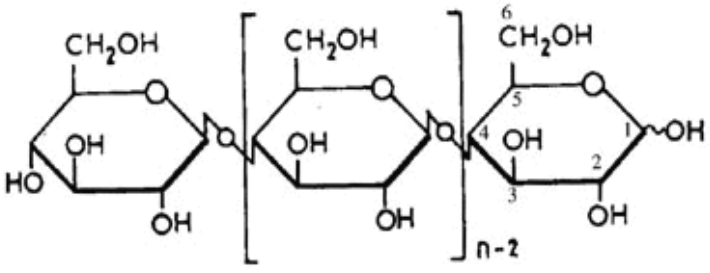
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน (พื้นฐานแห้ง (Dry basis)) **[8]**

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

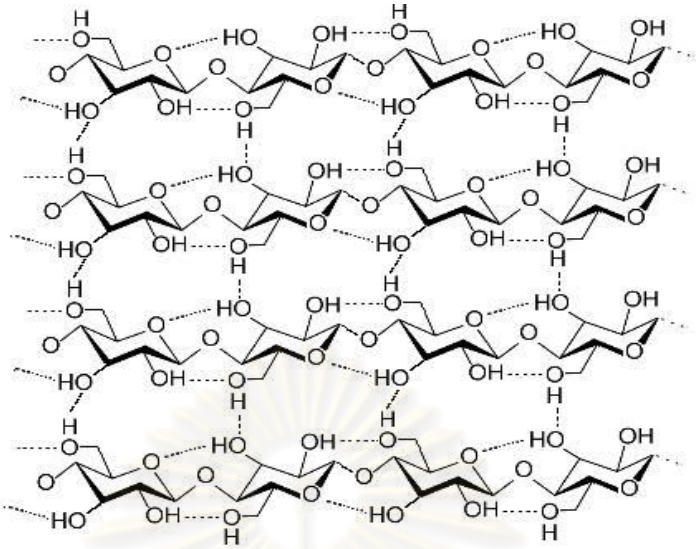
2.2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของดี – กลูโคส (D-glucose) ในรูปเบต้า-ดี-กลูโคไพราโนส (ß-D-glucopyranose) หลายโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายลูกโซ่ แต่ละโมเลกุลจับกันด้วยพันธะ 1, 4-ไกลโคสิดิก (1, 4-glucosidicbond) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสโมเลกุลถัดไป

รูปแบบ (Conformation) ของการจัดเรียงตัวของหน่วยดี-กลูโคสอยู่ในลักษณะเป็นรูปเก้าอี้ (Chair form) แต่ละโมเลกุลในสายเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, -OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวน (Ring) ของโมเลกุลถัดไป และเชื่อมต่อระหว่างสายเซลลูโลสที่ขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลดี-กลูโคสในอีกสายหนึ่ง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลส (รูปที่ 2.2) มีลักษณะเป็นเส้นตรงไม่มีแขนงย่อย มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $-(C_6H_{10}O_5)_n-$ เมื่อ n คือจำนวนหน่วยของดี-กลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง ดังรูป 2.3



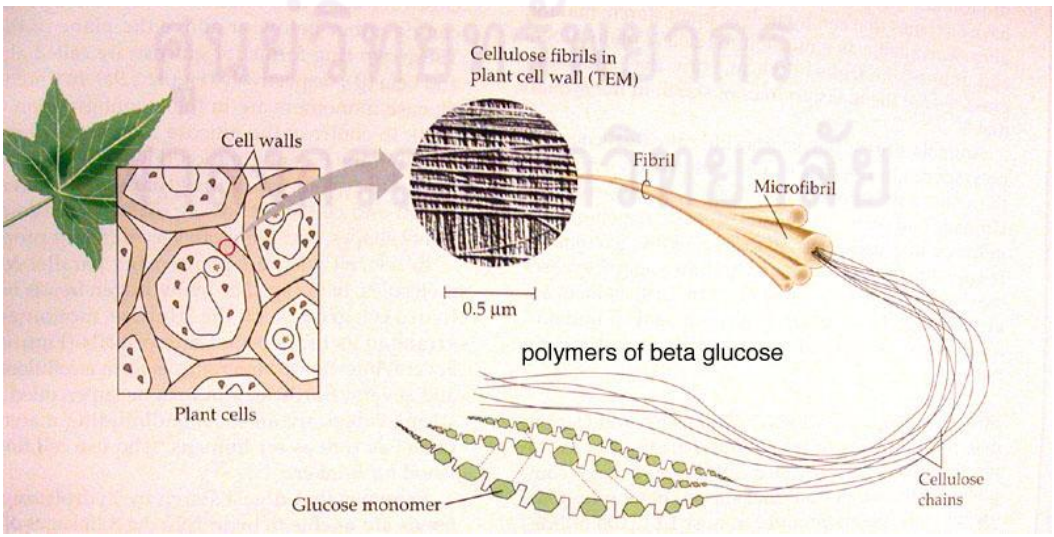
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างการจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลส **[9]**

หน่วยย่อยของดี-กลูโคส ต่อ 1 โมเลกุลเซลลูโลส (Degree of polymerization) จะมีตั้งแต่ 15 หน่วย จนถึง 14,000 หน่วย น้ำหนักโมเลกุลมีค่า 50,000 – 250,000 ดาลตัน (น้ำหนักโมเลกุลของกลูโคส เท่ากับ 180.16 ดาลตัน) ความยาวของหน่วยย่อย ดี-กลูโคส 0.515 นาโนเมตร และความยาวทั้งหมดของโมเลกุล และความยาวทั้หมดของโมเลกุลเซลลูโลสมีค่ามากกว่า 5 ไมโครเมตร

จากการจัดเรียงตัวเหล่านี้ทำให้สายเซลลูโลสเรียงตัวขนานซึ่งกันและกันอย่างมีระเบียบ ในลักษณะที่เรียกว่า คลิสตัสไลน์ไมเซล (Crystalline micelles) โดยแต่ละไมเซลประกอบด้วยโมเลกุลเซลลูโลสประมาณ 100 โมเลกุล มีรูปร่างเป็นแถบหนา ไมเซลประมาณ 10-40 ไมเซลจะมาเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นมาเรียกว่า ไมโครไฟบริล (Micro fibril) ดังรูป 2.4



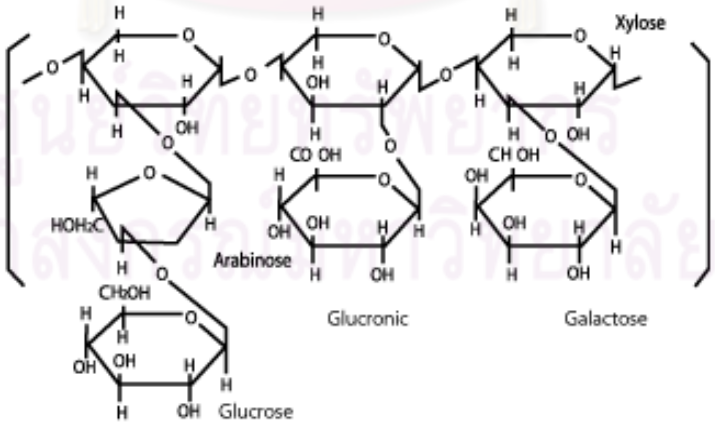
รูปที่ 2.4 แสดงไมโคลไฟบริลในเซลลูโลส **[10]**

2.2.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่จะอยู่ในรูปอสัณฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลส และมีมวลต่ำกว่ามากเซลลูโลส ส่วนใหญ่จะเกิดจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวพวกดี-กลูโคส ส่วนเฮมิเซลลูโลสมักจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่างชนิดหลาย ๆ ตัวมาต่อกันเป็นกลุ่มดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างส่วนใหญ่จะคล้ายกับพวกเซลลูโลส ยกเว้นพวกพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย 50-200 หน่วย และต่อกันแบบกิ่งก้านสาขามากกว่าแบบเส้นตรง โดยส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ได้แก่ ดี-ไซเลน (D-xylane) ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลไซโลส (Xylose) หลายๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1, 4- ไกลโคสิดิก **[11]**

สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเฮทเทอโรจีนัส (Heterogenous) ประกอบไปด้วยพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) หลายชนิดปนกัน ได้แก่

- เพนโตซาน (Pentosan) ส่วนใหญ่เป็นไซเลน (Xylane) และอะราเบน (Araban) เมื่อนำไปย่อยจะได้น้ำตาลไซโลสและอะราบิโนส (Arabinose)
- เฮกโซแซน (Xsosane) ส่วนใหญ่เป็นแมนแนน (Mannose) กาแลคแทน (Galactan) และกลูแคน (Glucan) เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส (Mannose) กาแลคโตส (Galactose) และกลูโคส
- พอลิยูโรไนด์ (Polyuronides) ส่วนมากเป็นสารประกอบกรดพอลิยูโรติก (Polyuronic acid) และกรดยูโรนิก (Uronic acid)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส **[12]**

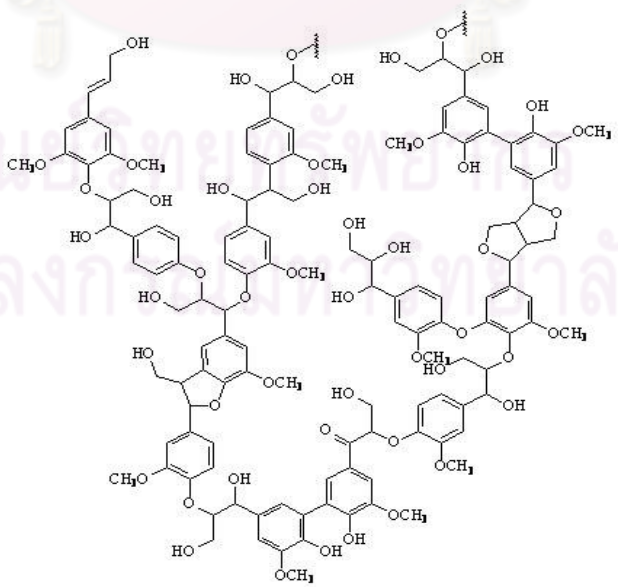
ข้อแตกต่างระหว่างเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลสคือ เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกย่อยด้วสารละลายกรดเจือจาง สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 นอกจากนี้สาย

พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะกิ่งก้านสาขามากกว่า สามารถดูดซับน้ำได้ดีและมีความยาวสายโซ่พอลิเมอร์สั้นกว่า โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคสมีสูตรโมเลกุล คือ $-(C_6H_{12}O_5)_2n$

2.2.1.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบอโรมาติกเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง พบได้ในผนังเซลล์ของพืชรองลงมาจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนตัวเชื่อมประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงของเนื้อไม้ โดยประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด

โครงสร้างพื้นฐานของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane, C_6-C_3) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_9H_{7.95}O_{2.4}(OCH_3)_{0.92}$ มีมวลโมเลกุลประมาณ 184 ต่อ 1 หน่วยมอนอเมอร์ **[13]** โดยสามารถแบ่งได้หน่วยย่อยของลิกนินได้ 3 ชนิดคือ P-coumaryl alcohol, Coniferyl alcohol และ Sinapyl alcohol โดยการจัดเรียงตัวของธาตุในโครงสร้างของโมเลกุลนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด **[14]** เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะแบบเดียวแต่จะเกาะกันเป็นสายโซ่ยาวหลายแบบมีส่วนโครงสร้างที่สำคัญคือ ส่วนของโครงสร้างอโรมาติก (Aromatic structure) ที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซี (Methoxy group, $-OCH_3$) เป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ14 หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) และมีหมู่ฟีโนลิก (Phenolic group) เป็นส่วนประกอบ โดยโครงสร้างของลิกนินในรูปที่ 2.6 ไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติความยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นพืชที่มีลิกนินสูงจะมีความแข็งแรงทนทานสูง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน **[15]**

2.2.2 ส่วนประกอบของชีวมวล

ชีวมวลแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะอย่าง สมบัติบางอย่างถือเป็นจุดเด่น สมบัติบางอย่างถือเป็นจุดด้อย เช่น

- การกระจายตัวของแหล่งชีวมวล
- ขนาด
- ความชื้น
- สิ่งเจือปน
- ปริมาณขี้เถ้า

ดังนั้น ถ้าจะนำชีวมวลใดมาผลิตไฟฟ้า ต้องออกแบบเครื่องจักรให้เหมาะสมกับชีวมวลนั้นๆ เพื่อประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม สมบัติอย่างหนึ่งของชีวมวลที่เหมือนกันคือ มีน้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ โรงไฟฟ้าชีวมวลจึงควรอยู่ใกล้กับแหล่งผลิตชีวมวลเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งให้มากที่สุด

2.2.2.1 การกระจายตัวของแหล่งชีวมวล

รูปแบบการกระจายตัวของแหล่งชีวมวล มี 2 ลักษณะคืออยู่รวมเป็นกลุ่ม และอยู่กระจัดกระจาย ชีวมวลที่อยู่รวมเป็นกลุ่มคือเศษชีวมวลจากกระบวนการแปรรูป ณ ที่ใดที่หนึ่ง เช่น โรงสีข้าว โรงงานผลิตน้ำตาลทราย โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา เป็นต้น ที่อยู่กระจัดกระจายตามพื้นที่เพาะปลูกหรือไม่มีการรวบรวม เช่น การสีข้าวโพดโดยอาศัยอุปกรณ์สีข้าวโพดที่เคลื่อนที่ได้ และเศษไม้-ปลายไม้จากสวนป่ายางพารา เป็นต้น ส่วนการนำชีวมวลที่อยู่กระจัดกระจายมา เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า จะมีข้อเสียเปรียบคือ เสียค่าใช้จ่ายในการรวบรวมเพิ่มขึ้น

2.2.2.2 ขนาดและรูปร่าง

ขนาดของชีวมวลเป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่ต้องพิจารณา ถ้าชีวมวลมีขนาดใหญ่ เช่น แกลบมีขนาดเล็กไม่เกิน 1 เซนติเมตร ชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลจะมีสภาพเป็นเส้นยาว 10 – 20 เซนติเมตร เศษไม้หรือปลายไม้ จากสวนป่ายางพารา และปีกไม้ที่ได้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารา เป็นต้น จะมีขนาดใหญ่เกินไปจึงไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้เป็น เชื้อเพลิงโดยตรง เพราะประสิทธิภาพการเผาไหม้จะต่ำ ดังนั้นควรจะนำมาย่อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น แต่ก็มีค่าใช้จ่ายในการย่อยเพิ่มขึ้นเช่นกัน

2.2.2.3 ความชื้น

ความชื้นของชีวมวลเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการนำมาเป็นเชื้อเพลิง ชีวมวลในสภาพสดจะมีความชื้นสูง เช่นไม้สดมีความชื้นประมาณร้อยละ 50-60 ทางปาล์มมีความชื้นประมาณร้อยละ80 และซังข้าวโพดมีความชื้นประมาณร้อยละ 40-50 เป็นต้น ถ้าชีวมวลมีความชื้นสูงมาก เช่น กากมันสำปะหลังหรือส่าเหล้า ซึ่งมีความชื้นประมาณร้อยละ 80-90 ไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้ แต่อาจจะนำมาผ่านกระบวนบีบอัด (Dewatering) เพื่อลดความชื้นก่อนนำไปเผา หรือนำมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าได้เช่นกัน ในกรณีของเศษไม้ มีความชื้นประมาณร้อยละ 50-60 ถ้านำมาเก็บไว้ล่วงหน้าระยะหนึ่ง ความชื้นจะลดลงโดยธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือ เสียพื้นที่ในการจัดเก็บ และถ้าเก็บไว้นานไปไม้มีโอกาสผุได้ แต่มีชีวมวลประมาณ 3 ชนิดที่ความชื้นค่อนข้างต่ำคือ

- แกลบ เนื่องจากกระบวนการสีข้าว ข้าวเปลือกจะถูกลดความชื้นลงเหลือร้อยละ 12-14 เพื่อป้องกันการแตกหักของข้าวสารขณะทำการสี ดังนั้นแกลบที่ได้จะมีความชื้นต่ำกว่าข้าวเปลือก
- ใบอ้อยยอดอ้อย มีความชื้นประมาณร้อยละ 10 เพราะอยู่ส่วนนอกของลำต้นที่รับแสงแดดตลอดเวลา
- กะลาปาล์ม มีความชื้นประมาณร้อยละ 12

2.2.2.4 สิ่งเจือปน

ชีวมวลจะมีสิ่งแปลกปลอมและสิ่งเจือปนในชีวมวลมีหลายอย่างเช่น เศษดิน หิน กรวด ทราย และคราบน้ำมันปาล์ม เป็นต้น สิ่งเจือปนที่ต้องระมัดระวังให้มากคือ สารอัลคาไลน์ในทะลายปาล์ม เพราะเมื่อถูกความร้อนที่อุณหภูมิระดับหนึ่งจะกลายเป็นยางเหนียวเกาะติดท่อน้ำในห้องเผาไหม้ ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลง ดังนั้นในการออกแบบห้องเผาไหม้ต้องพิจารณาจุดนี้เป็นพิเศษ

2.2.2.5 ปริมาณขี้เถ้า

ขี้เถ้าคือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าว ปริมาณขี้เถ้าของชีวมวลมีผลต่อการเผาไหม้เช่นกัน โดยเฉพาะแกลบจะมีปริมาณขี้เถ้าร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการออกแบบห้องเผาไหม้จะต้องพิจารณาถึงการรวบรวมขี้เถ้าออกจากห้องเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 พืชชีวมวล

โดยชีวมวลในประเทศไทยมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งในการนำมาใช้ประโยชน์ต้องคำนึงถึงความเหมาะสม และจุดเด่นจุดด้อยที่มีความแตกต่างกันไป จากการศึกษาศักยภาพของชีวมวล จะพิจารณาถึงพืชที่มีการปลูกมาเป็นหลัก และพืชที่มีแนวโน้มในการปลูกที่เพิ่มขึ้นตามนโยบายของรัฐ ซึ่งมี 7 ชนิดสำคัญคือ

1. ข้าวเปลือกมีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 60 ล้านไร่ มีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือ แกลบ และฟางข้าว
2. อ้อยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 6 ล้านไร่ มีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือชานอ้อย ใบอ้อย และยอดอ้อย
3. สวนยางพารามีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 12 ล้านไร่ มีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือ ขี้เลื่อย ปีกไม้ ปลายไม้ กิ่งก้านและรากไม้
4. ปาล์มน้ำมันมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 1.5-2 ล้านไร่ มีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือ ไฟเบอร์ กะลาปาล์ม ทะลายเปล่า ทางปาล์มและลำต้น
5. มันสำปะหลังมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 7 ล้านไร่ มีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือกาก มันสำปะหลัง เปลือกดิน เปลือกล้าง และเหง้ามันสำปะหลัง
6. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พื้นที่ปลูกประมาณ 8 ล้านไร่ มีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือ ซังข้าวโพด และลำต้น
7. ไม้ยูคาลิปตัสมีพื้นที่ปลูกประมาณ 3 ล้านไร่ มีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

2.3.1 แกลบ (Rice husk)

เป็นผลิตผลพลอยได้จากการสีข้าวเปลือก มีรูปร่างเล็กยาวไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร มีสีเหลือง ดังรูปที่ 2.7 ความชื้นไม่เกินร้อยละ 15 แกลบสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ได้หลายอย่าง ประโยชน์ที่สำคัญของแกลบ คือ ใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เช่น การใช้แกลบในกระบวนการแกสิซิฟิเคชั่น การอัดแกลบเป็นก้อนเชื้อเพลิง เป็นต้น แกลบมีจุดเด่นตรงที่มีความชื้นต่ำ และมีขนาดเล็กเหมาะสำหรับทำเชื้อเพลิง นอกจากการนำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่างๆแล้ว ยังสามารถนำไปผสมกับวัสดุอื่นๆทำเป็นวัสดุก่อสร้าง แกลบยังถูกนำไปผลิตเป็นขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เพื่อนำขี้เถ้าแกลบไปใช้ประโยชน์อีกมาก ซึ่งส่วนประกอบหลักของขี้เถ้าแกลบ คือ ซิลิกา (SiO_2) มากกว่า ร้อยละ 90 และหากสามารถควบคุมสมบัติของขี้เถ้าได้ตามที่ผู้ซื้อต้องการก็จะสามารถจำหน่ายได้ราคาดี อย่างไรก็ตามปัญหาของชีวมวลชนิดนี้ อยู่ที่การมีน้ำหนักเบา (1

ลูกบาศก์เมตร หนัก 123 กิโลกรัม) จึงอาจเกิดการฟุ้งกระจายระหว่างการขนส่ง และในการเผาไหม้จะเกิดขี้เถ้าร้อยละ16-18 โดยน้ำหนัก ซึ่งถ้ามีการจัดการไม่ดีพอ ก็จะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม

รูปที่ 2.7 แกลบ **[16]**

2.3.2 ชานอ้อย (Bagasse)

หมายถึง ส่วนของลำต้นอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกแล้ว ดังรูปที่ 2.8 ชานอ้อยจะมีส่วนประกอบอย่างหยาบๆคิดเป็นค่าร้อยละ โดยน้ำหนักของชานอ้อยเปียก (ความชื้นร้อยละ 48) คือ ชานอ้อยหรือไฟเบอร์ (Fiber) ร้อยละ 48.5 น้ำร้อยละ 48.0 น้ำตาลร้อยละ 3.0 และสารประกอบอื่นๆ นอกจากที่กล่าวแล้วร้อยละ 0.5 ชานอ้อยใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ภายในโรงงานน้ำตาล ชานอ้อยสามารถใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oil) ได้ดี ชานอ้อยที่มีความชื้นร้อยละ 50 หนัก 3 ตัน เมื่อเผาจะให้พลังงานไล่เลี่ยกับน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก 1 ตัน และยังใช้ผลิตวัสดุก่อสร้างโดยอาศัยกาว เช่น อัดเป็นแผ่น (Particle board) ไม้อัดผิวเส้นใย (Fiber-overlaid plywood) และแผ่นกันความร้อน (Insulating board) ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ (Pulp) และกระดาษชนิดต่างๆ ชานอ้อยส่วนใหญ่ประกอบด้วยลิกนินและมีเซลลูโลสอยู่บ้างเล็กน้อย ไฟเบอร์ของชานอ้อยค่อนข้างสั้น คือ มีความยาวเฉลี่ยเพียง 1.4 มิลลิเมตรเท่านั้น ในขณะที่เยื่อใยของไม้ไผ่เฉลี่ย 2.5-4.0 มิลลิเมตรใช้เป็นอาหารสัตว์ ชานอ้อยถ้าให้สัตว์กินโดยตรงมักจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการย่อยของสัตว์ตลอดจนมีอัตราส่วนต่ำระหว่างอาหารที่สัตว์กินกับน้ำหนักตัวที่เพิ่ม วิธีที่ดีก็คือนำมาหมักก่อนที่จะให้สัตว์กิน วัสดุที่หมักประกอบด้วยชานอ้อย 1 ตัน (ความชื้นร้อยละ 55) โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักแห้ง กากน้ำตาลร้อยละ 15 ยูเรียร้อยละ 0.8 และข้าวโพดร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ผสมแล้วทำให้มีความชื้นประมาณร้อยละ 60 หมักไว้ 4-6 สัปดาห์ จึงให้สัตว์กินใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมผลิตทำปุ๋ยหมัก โดยหมักร่วมกับปุ๋ยคอกกากตะกอนหรือปุ๋ยวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้ยังใช้ปูคอกสัตว์เพื่อรองรับมูลสัตว์ และทำปุ๋ยหมักต่อไปใช้เป็นวัตถุคลุมดินเพื่อรักษาความชื้นของดินและป้องกันวัชพืช

รูปที่ 2.8 ชานอ้อย **[17]**

2.3.3 กากปาล์ม (Palm fiber)

กากปาล์มสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งกะลาปาล์มให้ความร้อนสูงมากจึงเหมาะสมที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิง และเนื่องจากทะลายปาล์มมีขนาดใหญ่ ดังนั้นก่อนนำมาทำเป็นเชื้อเพลิง จึงต้องผ่านกระบวนการย่อยก่อน นอกจากนี้ยังมีสารประกอบคลอไรด์สูง จึงต้องมีการออกแบบหม้อต้ม (Boiler) เป็นพิเศษ เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน โดยในรูปที่ 2.9 จะแสดงภาพของกากปาล์มที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

รูปที่ 2.9 กากปาล์ม **[18]**

2.3.4 เศษไม้ (wood residual)

สามารถนำขี้เลื่อยไปใช้เพาะเห็ด ทำฐูป คลุมเผาถ่าน เป็นชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมบ่มยางพารา และใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งยังมีเศษไม้อีกมากที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่น รากไม้ ปลายไม้ และปีกไม้ แต่ข้อด้อยของเศษไม้ คือ เศษไม้สด จะมีความชื้นสูงประมาณ

ร้อยละ 50 จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการย่อยเพื่อให้ลดความชื้นก่อนนำไปเผา โดยในรูปที่ 2.10 แสดงภาพเศษไม้จากอุตสาหกรรมโรงเลื่อย

รูปที่ 2.10 เศษไม้ **[19]**

2.3.5 ซังข้าวโพด (corncob)

ซังข้าวโพดเป็นส่วนได้จากการสีข้าวโพดนำเมล็ดมาใช้งาน ดังรูปที่ 2.11 ส่วนใหญ่เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงและเป็นวัตถุดิบในการทำอาหารสัตว์ ชีวมวลชนิดนี้ มีค่าความร้อนสูงเมื่อเทียบกับชีวมวลอื่นๆแต่การเก็บรวบรวมยังทำได้ลำบาก เพราะส่วนใหญ่ชาวไร่นิยมทำการฝังกลบมากกว่า

รูปที่ 2.11 ซังข้าวโพด **[20]**

2.3.6 เศษวัสดุเหลือใช้จากมันสำปะหลัง (Cassava residual)

การเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังสดนั้นพบว่ามีส่วนของลำต้นที่ติดกับส่วนของหัวมันสด หรือส่วนที่เรียกว่า เหง้ามันสำปะหลัง ดังรูปที่ 2.12 เป็นส่วนที่แข็งของต้นมันสำปะหลัง ทำให้เกษตรกรต้องตัดทิ้งเป็นจำนวนมากเนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังดังกล่าวไม่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังได้ จากวิเคราะห์ค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังแห้ง พบว่ามีค่าความร้อนสูงถึง 3,500 – 4,058 แคลอรีต่อกรัม พอจะเทียบได้จากค่าความร้อนของไม้ฟืน หรือหากจะเทียบกับค่าความร้อนของน้ำมันเตาประมาณ 9,500 แคลอรีต่อลิตร **[21]**

รูปที่ 2.12 เหง้ามันสำปะหลัง **[22]**

2.3.7 ผักตบชวา (Water hyacinth) หรือ (Eichhornia crassipes)

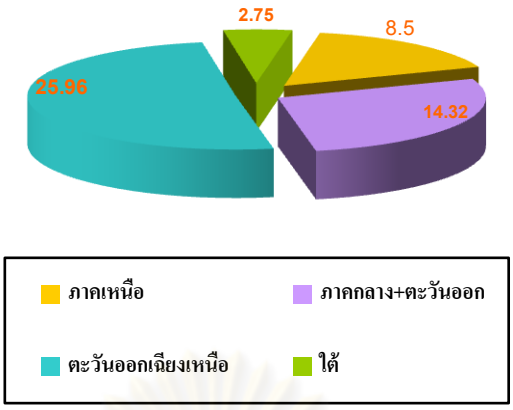
ผักตบชวาเป็นพืชที่เจริญอยู่บนผิวน้ำจัดเป็นประเภทลอยน้ำ (Floating plant) ดังรูปที่ 2.13 โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดินจึงถูกกระแสลมหรือน้ำพัดพาไปได้ไกลๆแต่ถ้าน้ำตื้นแล้วรากจะหยั่งยึดติดกับพื้นดินได้ลักษณะทรงต้น ประกอบด้วยกลุ่มของใบเรียงกันเป็นกระจุกในต้นหนึ่งๆจะมีใบตั้งแต่สองใบขึ้นไปที่โคนก้านใบจะมีกาบใบ (Sheath) ลักษณะเป็นเยื่อบางๆสีขาวแกมเขียวอ่อนๆแต่เมื่อมีอายุมากขึ้นก็จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลบริเวณของกาบใบเป็นสีน้ำตาลแกมม่วงจะเชื่อมติดต่อกันโดยมีไหล (Stolon) ซึ่งเป็นลำต้นที่ทอดไปตามผิวน้ำช่วยในการขยายตัวของผักตบชวาให้เพิ่ม ต้นผักตบชวาจะมีไหลแตกต้นออกไปได้หลายอันเมื่อไหลแตกออกไปแล้ว ก็จะเจริญขึ้นเป็นต้นใหม่แต่ยังติดกับต้นเดิมอยู่และเกิดเป็นกอขึ้นพร้อมทั้งมีรากเกิดขึ้นรากของผักตบชวาเป็นแบบรากฝอย (Fibrous root) คือมีรากย่อยๆเป็นกระจุกรากที่แทงออกจะมีลักษณะอวบสีขาวเมื่อมีอายุมากขึ้นจึงจะมีรากขนอ่อนที่มีสีน้ำตาลอ่อน

รูปที่ 2.13 ผักตบชวา **[23]**

2.3.8 ฟางข้าว (Rice straw)

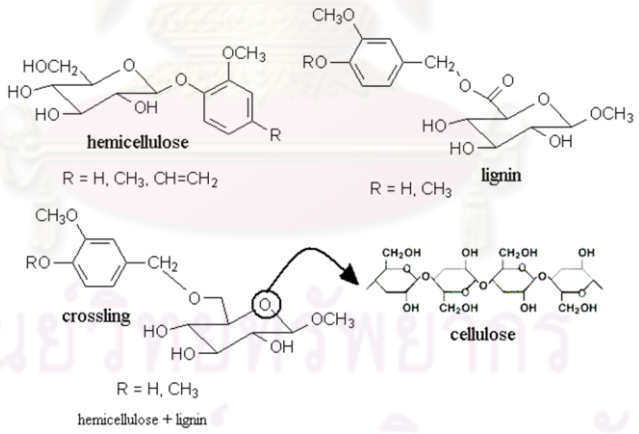
ฟางข้าวเป็นผลิตผลที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวข้าวของเกษตรกร ข้าว (Rice) **[24]** เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้าที่สามารถกินเมล็ดได้ ถือเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่นเดียวกับหญ้า ฟางข้าวส่วนใหญ่จะเป็นส่วนลำต้นของต้นข้าวที่มีการคัดเอาเมล็ดข้าวออกไปแล้วจากกระบวนการเก็บเกี่ยว ดังรูปที่ 2.14 ฟางข้าว **[25]** เป็นอินทรีย์วัตถุที่มีประโยชน์สูง ฟางข้าวจำนวน 1 ตัน เมื่อหมักแล้วจะได้ธาตุอาหารทั้งธาตุหลักและธาตุรอง ดังนี้คือ ไนโตรเจน (N) 6 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส (P_2O_5) 1.4 กิโลกรัม โพแทสเซียม (K_2O) 17 กิโลกรัม แคลเซียม (Ca) 1.2 กิโลกรัม แมกซีเซียม (Mg) 1.3 กิโลกรัม และที่สำคัญคือได้ธาตุซิลิกา (SiO_2) จำนวน 50 กิโลกรัม ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปีและนาปรังหนึ่งมากว่า 70 ล้านไร่ และผลิตข้าว ปีละไม่ต่ำกว่า 21 – 25 ล้านตัน และมีวัสดุเหลือที่เรียกว่าฟางข้าวและตอซังข้าว ประมาณ 3 เท่าของเมล็ดข้าว เมื่อคิดแล้วจะได้ฟางคิดเป็นปริมาณตอซังถึง 50-70 ล้านตัน (แบ่งตามภูมิภาคต่างๆ ดังรูปที่ 2.15) จากจำนวนข้าวที่ผลิตได้ดังกล่าว ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย (คิดเป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่า 30,000 ล้านบาท) แต่ฟางข้าวจำนวนมหาศาลที่ได้นี้แทบจะไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์

รูปที่ 2.14 ฟางข้าว **[26]**



รูปที่ 2.15 แสดงปริมาณฟางข้าวในภูมิภาคต่างๆ ปี พ.ศ. 2552

ฟางข้าวมีองค์ประกอบหลักที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส (Cellulose) ประมาณร้อยละ 30-35 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ประมาณร้อยละ 25-30 และ ลิกนิน (Lignin) ประมาณร้อยละ 8-12 โดยมีพันธะไฮโดรเจนและพันธะเอสเทอร์ยึดติดกันไว้ ดังรูปที่ 2.16 เถ้า (Ash) ร้อยละ 12-20 และน้ำร้อยละ 13-17 ซึ่งจากการที่ฟางข้าวมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ทำให้ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่มีสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ



รูปที่ 2.16 โครงสร้างเคมีของฟางข้าว

2.4 ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (Heating value) **[27]** คือ พลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง แล้วผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มีอุณภูมิสุดท้ายเท่ากับอุณภูมินี้ ค่าความร้อนที่ใช้มีทั้งค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ ซึ่งขึ้น อยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ค่าความร้อนต่ำ คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ ส่วน

ค่าความร้อนสูง คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว โดยค่าความร้อนสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$HHV\ (MJ/kg) = LHV\ (MJ/kg) + 0.02395\ (9H + MC_t) \quad (2.1)$$

MC_t คือ ปริมาณร้อยละของความชื้น

ในการหาค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าประมาณกลางๆ คือ 10 -20 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยค่าความร้อนของชีวมวลกลุ่มไม้จะมีค่าสูงกว่ากลุ่มไม่ใช่ไม้เล็กน้อยค่า ความร้อนขึ้นอยู่กับกับองค์ประกอบและสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรืออยู่ในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (MC_t) และเศษเถ้า หรือได้จากการใช้สูตรอย่างง่ายคำนวณ เช่น สูตรของดูลอง (Dulong formula) โดยใช้ค่าสัดส่วนโดยมวลของแต่ละธาตุที่เกี่ยวข้อง

$$HHV\ (MJ/kg) = 33.585\ C + 141.924\ H + 12.908\ S - 15.327\ O - 3.538\ O^2 \quad (2.2)$$

สูตรของเดเมียบาส **[28]**

$$HHV\ (MJ/kg) = 33.5\ C + 142.3\ H - 15.4\ O - 24.5\ N \quad (2.3)$$

$$HHV\ (MJ/kg) = 31.2\ FC + 15.34\ VM \quad (2.4)$$

2.5 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้น (Moisture content) แสดงออกมาเป็นสัดส่วนน้ำหนักของความชื้นต่อน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงแห้งหรือน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงรวมทั้งหมด

$$MCt = m_{H2O} / m_{total} \quad (2.5)$$

ปริมาณความชื้นของชีวมวลจะขึ้นอยู่กับพันธุ์ไม้ (เช่น ไม้สน ยางพารา กระถิน ต้นสัก เป็นต้น) ชนิดส่วนประกอบและกระบวนการเตรียม (เช่น ชีวมวลที่ได้จากการตัดแต่ง การสกัดเปลือก ชีวมวลจากโรงเรื่อย โรงผลิตเยื่อกระดาษ) ปริมาณความชื้นมีความหลากหลายมากในช่วง 10 – 60% จากเนื้อไม้ที่มีความพรุนและธรรมชาติของการรับและสูญเสียความชื้น นำไปสู่แนวคิดเกี่ยวกับจุดอิ่มตัวเส้นใย (Fiber saturation point, FSP) โดยมีนิยามว่าเป็นระดับปริมาณความชื้นที่

ช่องรูพรุนหรือพื้นผิวภายในเส้นใยของไม้ถูกปกคลุมด้วยชั้นน้ำซึ่งตรึงอยู่บนผิวได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน ฉะนั้นจุดอิ่มตัวเส้นใยนี้จึงเป็นจุดที่บ่งบอกถึงการหดตัวหรือการบวมของเนื้อไม้หากมีการดึงน้ำออกหรือเติมน้ำเข้าในเนื้อไม้ โดยทั่วไปจุดอิ่มตัวเส้นใยของไม้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 23-27 ของมวลรวมทั้งหมด

2.6 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

ในการแสดงลักษณะเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกได้เป็นแบบพื้นฐานเปียก (Wet basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (As-received basis) และแบบพื้นฐานแห้ง (Dry basis) ซึ่งเป็นการอบวัสดุเชื้อเพลิงโดยให้ความร้อนในภาชนะปิดภายใต้บรรยากาศของแก๊สควบคุมเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งมีข้อสังเกตคือ อัตราส่วนระหว่างสารระเหยต่อคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ประมาณ 2.5-3.5 เท่าสำหรับไม้ และ 2.5-5.2 เท่าสำหรับเศษวัสดุการเกษตร ปริมาณเถ้าในชีวมวลเศษวัสดุการเกษตรมีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวลประเภทไม้ ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ชีวมวลแบบแยกธาตุแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 คุณลักษณะทางกายภาพของผลิตผลทางการเกษตร (พื้นฐานที่รับมา) **[29]**

ชีวมวล	ความชื้น (%)	สารระเหย(%)	คาร์บอนคงตัว (%)	เศษขี้เถ้า(%)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
แกลบ	8.2	58.9	19.7	13.2	14,200
ฟางข้าว	8.1	61.1	15.5	15.3	13,100
ต้นข้าวโพด	8.4	70.3	16.0	5.3	12,900
ซังข้าวโพด	-	-	-	2.4	16,300
ซานอ้อย	7.9	71.2	13.1	7.7	13,400
ต้นปาล์ม	48.4	38.7	11.7	1.2	7,500
เส้นใยปาล์ม	31.8	48.6	13.2	6.4	11,800
ไม้ฟืน	20-40	70-80	10	0.5	16,000
ขี้เลื่อย	12.3	70.5	16.4	0.8	18,000
ขยะชุมชน	8.5	79.0	9.4	4.1	23,500

ตารางที่ 2.6 คุณลักษณะทางเคมีของผลิตผลทางการเกษตร (พื้นฐานแห้ง)

ชีวมวล	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
แกลบ	38.0	4.7	50.2	0.4	0.1
ฟางข้าว	38.5	6.1	39.3	0.7	0.2
ต้นข้าวโพด	44.2	5.8	43.5	1.3	< 0.01
ซังข้าวโพด	46.2	4.9	43.2	1.2	0.3
ซานอ้อย	44.9	5.9	40.7	0.8	< 0.01
ต้นปาล์ม	43.0	5.6	51.0	0.4	< 0.01
เส้นใยปาล์ม	47.2	6.0	36.7	1.4	0.3
ไม้ฟืน	51.8	5.7	40.9	0.1	< 0.01
ขี้เลื่อย	50.3	5.7	41.0	0.2	2.7
ขยะชุมชน	63.4	10.0	26.1	0.4	< 0.01

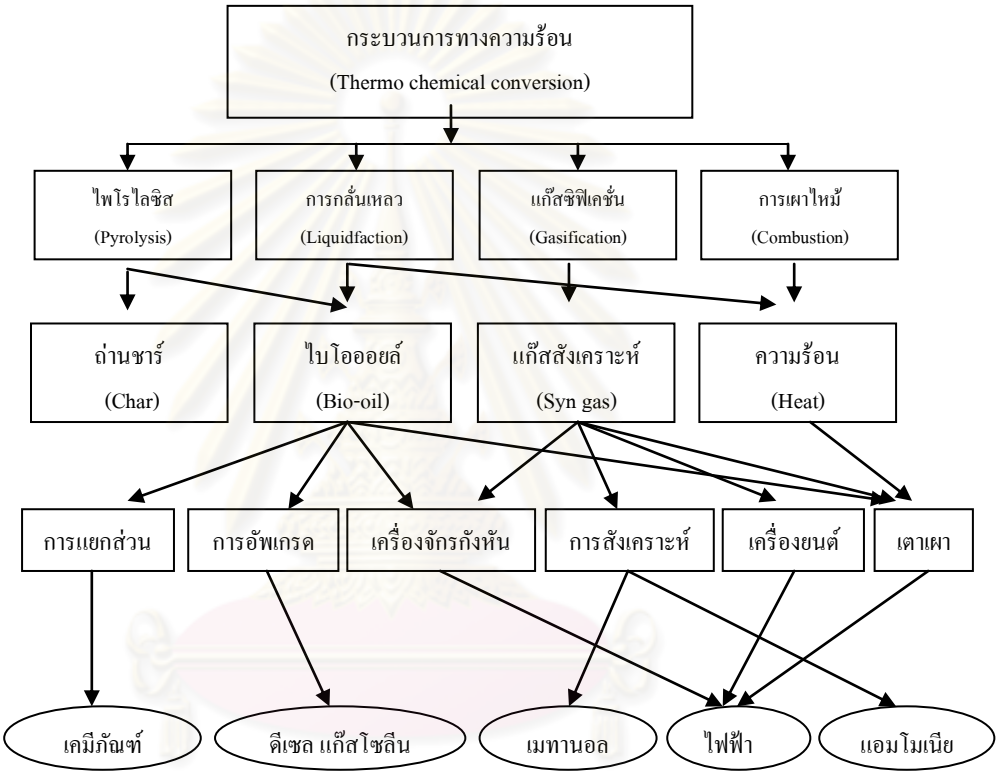
2.7 ส่วนประกอบของเศษเถ้า

ส่วนประกอบหลักของเศษเถ้าแสดงในตารางที่ 2.8 ซึ่งจะเห็นได้ถึงความหลากหลายในแต่ละชนิดของชีวมวล ส่วนประกอบที่พบมาก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) เหล็กออกไซด์ (FeO_3) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งพบได้ในชีวมวลทุกชนิด ส่วนประกอบอื่นที่น่าสนใจอีกได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งพบมากในเศษเถ้าของแกลบ โดยเฉลี่ยปริมาณเศษเถ้าในเศษวัสดุการเกษตรจะมีสูงกว่าในไม้ สารอินทรีย์ในเศษเถ้าของชีวมวลประเภทไม่ใช่ไม้มีซิลิกาและออกไซด์ของแอลคาไลสูงเป็นที่สังเกตได้ ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิหลอมตัวของเถ้าที่ลดต่ำลงและอาจสร้างปัญหาการเกาะติดของเถ้าบนพื้นผิวเตา

2.8 การแปรรูปชีวมวล

เมื่อพิจารณาถึงสมบัติของพวกชีวมวลจะเห็นได้ว่า ชีวมวลสามารถที่จะแปรรูปไปเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการต่างๆ ซึ่งอาจเป็นกระบวนการทางชีวภาพหรือกระบวนการทางเคมีความร้อนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ กระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis), แกซิฟิเคชัน (Gasification), ลิควิดแฟคชัน (Liquid faction) และการเผาไหม้ (Combustion) ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการขึ้นอยู่กับ

ภาวะที่ใช้ดำเนินการและผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 2.17 กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้ภาวะในการดำเนินการที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อน แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ทำให้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อนน่าสนใจมากกว่าแบบการเปลี่ยนองค์ประกอบของเคมีโดยวิธีชีวเคมี ทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.17 กระบวนการแปรรูปทางความร้อน (Thermo chemical conversion) และผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.8.1 การเผาไหม้ (Combustion)

เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาวะที่ใช้ออกซิเจนโดยจะเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้า ภาวะที่ใช้ดำเนินการ คืออุณหภูมิตั้งแต่ 800-1400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศเกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการใช้อากาศเกินพอน้อยเกินไปจนทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การศูนย์เสียศักยภาพทางความ

ร้อน (Potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือคาร์บอน (C)

การให้ความร้อนในครัวเรือน ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การเผาไหม้ชีวมวลคือ การให้ความร้อนในครัวเรือน เป็นตลาดสำคัญของชีวมวลในประเทศเมืองหนาว เช่น ออสเตรีย ฝรั่งเศส เยอรมนี และสวีเดน ซึ่งการเผาไม้ฟืนในเตาผิงในบ้านมีกันมาก การเผาไหม้แบบเก่านี้มีประสิทธิภาพลังงานต่ำ ราวๆ 10% และมีการปล่อยมลพิษออกมามาก การปรับปรุงระบบเพื่อลดปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การใช้ระบบอัตโนมัติ มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำความสะอาดไอเสีย มีการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่ง ทำให้ประสิทธิภาพรวมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ70-90 และมีมลพิษน้อยมาก ระบบดังกล่าวมีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

การผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในชุมชน การเผาไหม้ชีวมวลเพื่อผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในชุมชน (Combined heat and power, CHP) มีอย่างแพร่หลายในประเทศแถบสแกนดิเนเวีย ระบบแบบนี้ได้รับการส่งเสริมจากรัฐบาลให้มีการติดตั้งในชุมชน โดยในระยะแรกได้ดัดแปลงมาจากเตาเผาถ่านหิน และต่อมาใช้เป็นระบบที่เผาไหม้ชีวมวลโดยเฉพาะ ส่งผลให้ตลาดการใช้ชีวมวลเชิงพลังงานขยายตัวมากขึ้น โดยในประเทศส่วนใหญ่จะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่หาได้ในพื้นที่ เช่น เศษไม้ ฟางข้าว เป็นต้น การมีส่วนร่วมของชุมชนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงการลักษณะนี้ประสบความสำเร็จ เพราะมีการจ้างงานและมีการลงทุนในท้องถิ่น ประโยชน์ก็คืนกลับสู่ท้องถิ่นด้วย

2.8.2 ลิควิแฟกชัน (Liquefaction)

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

ให้อัตราการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการรวมตัวของโมเลกุลที่แตกตัวจากการให้ความร้อนกลายเป็นพอลิเมอร์

2.8.3 แกซิฟิเคชัน

แกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนชีวมวลไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน โดยวัตถุดิบจะเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงโดยควบคุมปริมาณออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สสังเคราะห์ที่เรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาไหม้โดยตรงของเชื้อเพลิงเริ่มต้น มันสามารถเผาไหม้โดยตรงในภายในเครื่องยนต์หรือเปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้กระบวน Fischer-Tropsch แก๊สสามารถใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า กระบวน Fischer-Tropsch จะเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนไปเป็นไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของเหล็ก (Fe) หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

2.8.4 ไพโรไลซิส

Pyro เป็นภาษากรีกมีความหมายว่า ความร้อน ดังนั้นถ้า hydrolysis หมายถึงการเกิดปฏิกิริยาของสารใดสารหนึ่งกับน้ำ หรือ alcoholysis หมายถึงการทำปฏิกิริยาของสารใดสารหนึ่งกับแอลกอฮอล์แล้ว ไพโรไลซิส (Pyrolysis) จะหมายถึงการทำปฏิกิริยาของสารใดสารหนึ่งกับความร้อน ในความเป็นจริงนั้นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) หรือการกลั่น (Destructive distillation) เป็นกระบวนการที่สารจะถูกสลายตัวส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ได้ถูกย่อยสลายทางเคมีด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิสูงๆ ในที่ที่อับอากาศปราศจากออกซิเจน หรือในที่ที่มีการจำกัด และควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหลือน้อยที่สุด ทำให้เกิดการสลายของเนื้อวัสดุออกไปเป็นองค์ประกอบย่อยๆชนิดต่างๆ หรือองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม

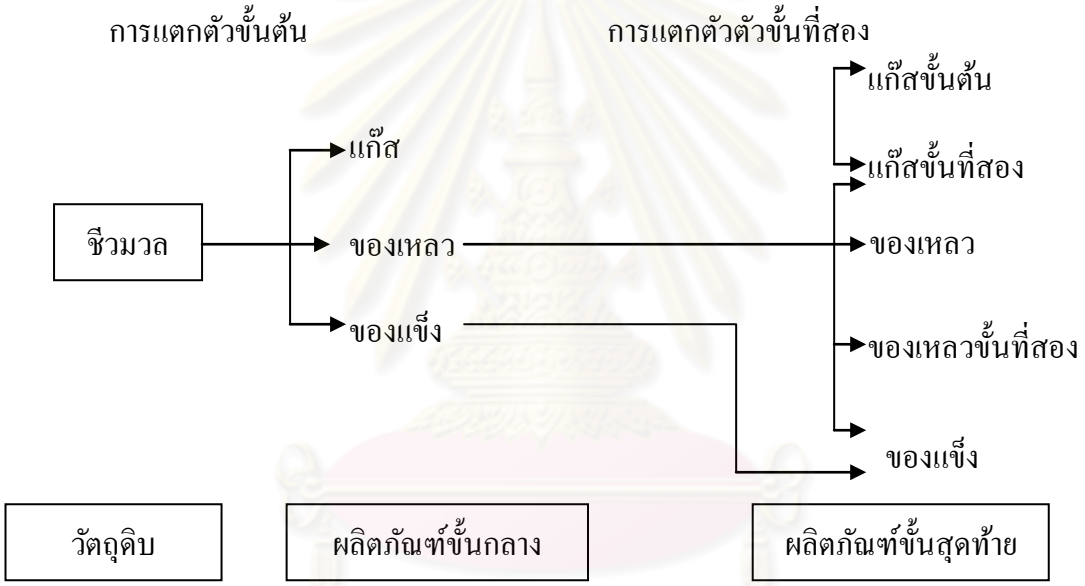
จากนิยามของกระบวนการไพโรไลซิสที่กล่าวมาจะพบว่าไพโรไลซิสมีความหมายและเป็นกระบวนการเดียวกับการเสื่อมสลายด้วยความร้อน จะต่างกันเล็กน้อยตรงที่การเสื่อมสลายด้วยความร้อนเช่น พอลิเมอร์เป็นการสลายตัวที่อุณหภูมิการใช้งานซึ่งไม่อาจจะสูงมาก การสลายตัวจึงเป็นไปอย่างช้าๆ แต่กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการใช้ความร้อนค่อนข้างสูง เร่งให้สารสลายตัวอย่างรวดเร็ว

2.9 กระบวนไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสหรือคาร์บอไนเซชั่น (Carbonization) เป็นการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) โดยไม่ใช้อากาศหรือออกซิเจนร่วมในปฏิกิริยา (ไม่ใช้ไอน้ำ ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ ของเหลว (Tar) ถ่านชาร์ (Charcoal) และแก๊ส

(Gas) เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆเพิ่มมากขึ้นได้แก่ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่น(Dehydration)การแตกตัวด้วยความร้อน(Thermal cracking)ไอไซเมอไรเซชั่น (Isomerization) ดีไฮโดรจิเนชั่น (Dehydrogenation) คอนเดนเซชั่น (Condensation) ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆเช่นน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านชาร์ สารประกอบออร์แกนิก (Organic compound)

กระบวนการไพโรไลซิสจะการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนของแก๊ส ของเหลว และของแข็งออกมา แสดงดังรูป 2.18 เมื่ออุณหภูมิลดลง สารที่ระเหยง่ายจะกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เรียกว่า “น้ำมันชีวภาพ” ส่วนแก๊สที่คงเหลืออยู่เป็นที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ (non-condensable gas) และผลผลิตที่ได้ จะต้องทำให้เย็นลงในทันทีเพื่อป้องกันการแตกตัวของน้ำมันชีวภาพ



รูปที่ 2.18 กระบวนการแตกตัวทางความร้อนของชีวมวล

ของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส เรียกได้ว่า ถ่านชาร์ (Charcoal) ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุถ่านเป็นหลักและมีเถ้าอนินทรีย์ผสมอยู่ด้วย ของเหลวที่ควบแน่นได้ที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า ของเหลวไพโรลิกเนียส (Pyroligneous liquid) หรือกรดไพโรลิกเนียส (Pyroligneous acids) หรือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis oil) ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำคล้ายน้ำมันดิบ บางครั้งเรียกว่า น้ำมันดิบชีวภาพ (Bio-crude oil) กระบวนการไพโรไลซิสสามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์สถานะหนึ่งมากที่สุดได้ โดยการควบคุมปัจจัยที่สำคัญต่างๆของกระบวนการ เช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

กระบวนการทางเคมีกายภาพที่เกิดขึ้นระหว่างไพโรไลซิสเป็นดังนี้ **[30]**

1. การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังชีวมวล เพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างในชีวมวลให้สูงขึ้น
2. การเริ่มเกิดไพโรไลซิสขั้นต้น มีการปล่อยไอสารระเหย และเกิดเป็นถ่านชาร์
3. การไหลของไอสารระเหยร้อนผ่านเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน
4. การควบแน่นของไอสารระเหยโมเลกุลใหญ่บางส่วนในเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ และตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองที่สามารถเปลี่ยนสารระเหยขั้นต้นเป็นน้ำมันดิน
5. การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองแบบเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเองไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น มีการแข่งกันแย่งสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา
6. การแตกตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น มีปฏิกิริยาร่วมเกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊ส ปฏิกิริยาเปลี่ยนโมเลกุลของแข็งเป็นแก๊สด้วยน้ำ ปฏิกิริยาการรวมตัวของสารอนุมูล ปฏิกิริยาการไล่น้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และความดัน

ปริมาณการเกิดแก๊สและสารระเหยต่างๆจะแปรผันตามช่วงอุณหภูมิ โดยในช่วง 155-200 องศาเซลเซียส จะเป็นการระเหยของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 200-280 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วงอุณหภูมิ 280-380 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงเริ่มการระเหยตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบของแก๊สเมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ **[31]**

Process	**Temperature (°C)**	**H_2 (mol%)**	**CO (mol%)**	**CO_2 (mol%)**	**HCs (mol%)**
Elimination of water	155-200	0	30.5	68.0	2.0
Evolution carbon oxides	200-280	0.2	30.5	66.5	3.3
Start hydrocarbon evolution	280-380	5.5	20.5	35.5	36.6
Evolution of hydrocarbon	380-500	7.5	12.3	31.5	48.7
Dissociation	500-700	48.7	24.5	12.2	20.4
Evolution of hydrogen	700-900	80.7	9.6	0.4	8.7

"HCs are hydrocarbon"

2.9.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับภาวะปฏิบัติการที่ใช้ ซึ่งหลักๆจะใช้เวลาหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นเกณฑ์ ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.9.1.1 ไพโรไลซิสแบบช้า

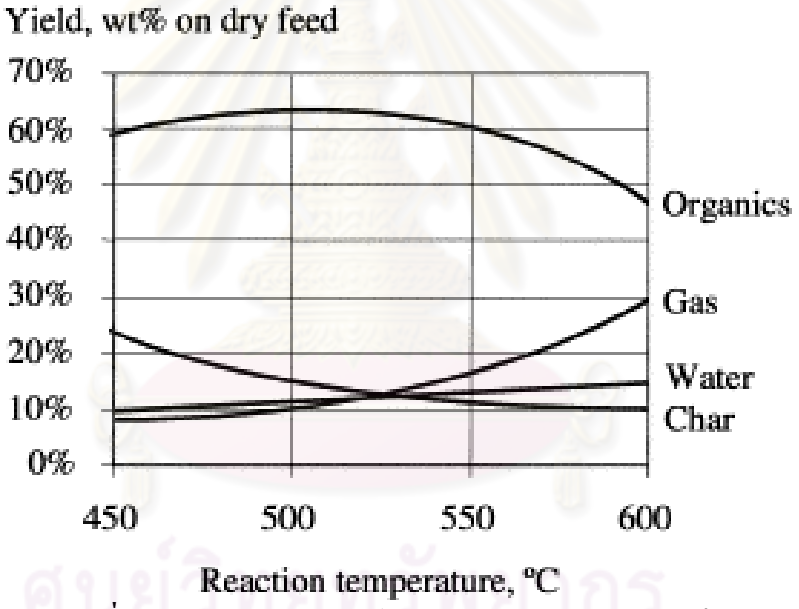
กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าหรือแบบทั่วไป (Conventional pyrolysis) เป็นกระบวนการที่มนุษย์รู้จักกันมานานแล้ว ซึ่งก็คือกระบวนการที่ใช้ในการทำถ่าน (Carbonization) ในกระบวนการไพโรไลซิสทั่วไป ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนที่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส ไอสารระเหยอยู่ในปฏิกิริยาเป็นเวลานาน 5 – 30 นาที ไม่หลุดออกไปเร็วจึงทำให้องค์ประกอบของไอสารระเหยยังคงเข้าทำปฏิกิริยากันอย่างต่อเนื่อง โดยได้เป็นถ่านและของเหลวออกมา กระบวนการจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและมีอัตราการให้ความร้อนช้าหรือรักษาอุณหภูมิให้คงที่ จะมีผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะออกมา หากควบคุมกระบวนการให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและมีอัตราการให้ความร้อนช้าจะส่งผลให้เกิดถ่านชาร์มากขึ้น

2.9.1.2 ไพโรไลซิสแบบเร็ว

ไพโรไลซิสแบบเร็วปีนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในระยะเวลาอันรวดเร็ว ในอัตราการให้ความร้อนสูงมากเมื่อเทียบกับแบบไพโรไลซิสแบบช้า หากกระบวนการไพโรไลซิสมีอัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น ปริมาณการเกิดสารระเหย แก๊ส และของเหลวจะมากขึ้นด้วย กระบวนการลักษณะแบบนี้เรียกว่า ไพโรไลซิสเร็วหรือเร็วมาก (Fast/flash pyrolysis) ซึ่งอาจเรียกเทคโนโลยีนี้ให้ถูกต้องยิ่งขึ้นว่า “Thermolisis” กระบวนการนี้เป็นการทำให้วัสดุชีวมวลซึ่งมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร ความชื้นน้อยกว่าร้อยละ10 เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วโดยอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10-50 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Resident time) น้อยมากในช่วง 0.5-2.0 วินาที และเกิดการแยกตัวออกเป็นถ่าน แก๊ส ไอและสารแขวนลอยในอากาศ เมื่ออุณหภูมิลดลงสารที่ระเหยง่ายจะกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เรียกว่า “น้ำมันชีวภาพ” ส่วนก๊าซที่ยังคงเหลืออยู่เป็นก๊าซที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ (Non condensable gas) และมีค่าความร้อนปานกลางปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจะได้น้ำมันชีวภาพประมาณร้อยละ 60 – 70 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ร้อยละ 15 – 25 และแก๊สเบาที่ไม่ควบแน่นร้อยละ 10 – 20 ขึ้นกับชนิดของชีวมวล ไม่มีของเสียทิ้ง เนื่องจากแก๊ส ถ่าน และน้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด ตัวอย่างข้อมูลจากการไพโรไลซิสไม้แบบเร็วแสดงดังรูปที่ 2.19 ที่อัตราการให้ความร้อนสูงมากๆ ปริมาณชีวมวลทั้งหมดอาจแปลงสภาพเป็นสารระเหยเหล่านี้ได้เกือบหมด

แล้วจึงควบแน่นมาเป็นของผสมสารเคมีภัณฑ์ ในการไพโรไลซิสแบบเร็วมากมีขั้นตอนสำคัญอยู่ 4 ขั้นตอน คือ

1. การให้ความร้อนและการถ่ายเทความร้อนในอัตราที่สูงมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้กับชีวมวลป้อนเข้าที่ถูกโม่บดเป็นผงเล็กๆ ก่อน
2. การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสให้แม่นยำที่ประมาณ 400 – 650 องศาเซลเซียส
3. การควบคุมให้ไอสารระเหยปล่อยออกมาเร็วและไม่เกิดปฏิกิริยาต่อโดยให้มีเวลาอยู่ในเตาปฏิกรณ์สั้นๆโดยปกติไม่ควรเกินกว่า 2 วินาที
4. ไอสารระเหยที่ได้ออกมาต้องถูกทำให้เย็นและควบแน่นโดยเร็ว เพื่อให้ได้ออกมาเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ



รูปที่ 2.19 ปริมาณผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสไม้แบบเร็ว

อัตราการให้ความร้อนในการไพโรไลซิสแบบเร็วมากอาจสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที อัตราการให้ความร้อนสูงและการทำไอระเหยให้เย็นอย่างรวดเร็วจะเป็นการแช่แข็งปฏิกิริยาบางส่วนโดยไม่ให้เข้าร่วมทำปฏิกิริยาในการแตกตัวต่อเป็นแก๊ส จึงทำให้ได้สารประกอบขั้นกลางมาเป็นส่วนประกอบในน้ำมันดิบชีวภาพ อัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วทำให้ได้ถ่านชาร์น้อยในบางภาวะสามารถลดการเกิดถ่านชาร์ได้หมด หากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเกิดที่อุณหภูมิสูงมากๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นแก๊ส กระบวนการโดยสรุปสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ลักษณะของกระบวนการที่สำคัญของไพโรไลซิส **[32]**

กระบวนการ	เวลาปฏิกิริยา	อัตราความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์หลัก
การทำถ่าน (Carbonization)	ชั่วโมง-วัน	ช้ามาก	400	ถ่านชาร์
แบบช้า (Conventional)	5-30 นาที	ช้า	600	ทั้งสามชนิด
แบบเร็ว(Fast)	0.5-5 วินาที	สูงมาก	650	น้ำมันชีวภาพ
แบบเร็ว(Fast)	< 1 วินาที	สูง	400-600	น้ำมันชีวภาพ
แบบเร็ว(Fast)	< 1 วินาที	สูง	> 650	สารเคมีและแก๊ส
แบบเร็วมาก(Flash)	< 0.5 วินาที	สูงมาก	1000	สารเคมีและแก๊ส
สุญญากาศ(Vacuum)	1-30 วินาที	ปานกลาง	400	น้ำมันชีวภาพ
น้ำ(Hydro-pyrolysis)	< 10 วินาที	สูง	<500	น้ำมันชีวภาพ
เมทานอล(Methano-pyrolysis)	< 10 วินาที	สูง	>700	สารเคมี

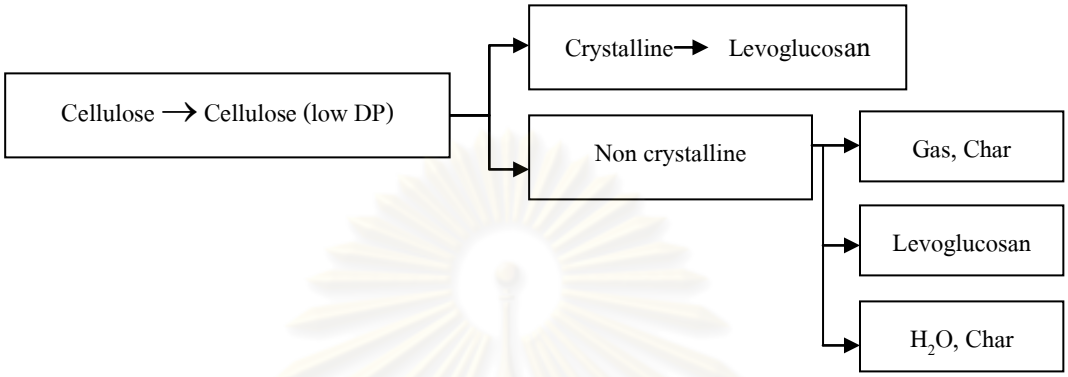
2.9.2 กลไกการไพโรไลซิส

องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแตกต่างจากถ่านหินและน้ำมันดิบ และการมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบทำให้กระบวนการไพโรไลซิสและผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างจากกลุ่มเชื้อเพลิงฟอสซิล ชีวมวลและชีวมวลอื่นๆ องค์ประกอบหลักของชีวมวลคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อได้รับความร้อน องค์ประกอบเหล่านี้ของไม้จะย่อยสลายทางความร้อนในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เพื่อให้เข้าใจกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ จำเป็นต้องพิจารณาพฤติกรรมของการไพโรไลซิสของแต่ละองค์ประกอบหลักของไม้ก่อน

2.9.2.1 เซลลูโลส

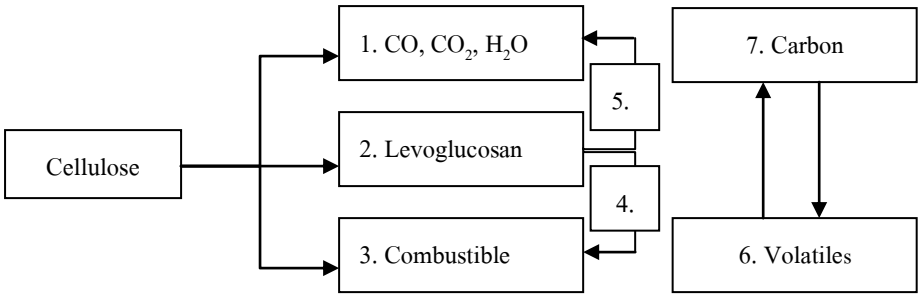
จากการศึกษาพบว่า กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงอุณหภูมิที่สำคัญ คือช่วงอุณหภูมิต่ำ (<250 องศาเซลเซียส) ในช่วงเริ่มต้นของการไพโรไลซิสจะมีการแตกพันธะไกลโคซิดิค (Glycocidic) ที่บริเวณขอบเขตระหว่างโครงสร้างรูปผลึกและอสัณฐานด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ทำให้อัตราการพอลิเมอไรเซชันลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1000 หน่วย มาคงที่ประมาณ 200 หน่วยในโครงสร้างทั้งที่เป็นรูปผลึกและอสัณฐาน สายของพอลิเมอร์จะไม่จับตัวเข้าคู่กัน (Unzipping) ซึ่งในโครงสร้างรูปผลึกจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นพวกเลโวกลูโคซานส่วนในโครงสร้าง อสัณฐานจะมีการแตกของสายเซลลูโลส ที่เกิดการแยกตัวของอะตอม

ไฮโดรเจนจากอะตอมของคาร์บอน ทำให้มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง สายของพอลิเมอร์ทั้งสองจะมีส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง (Active site) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (Cross link) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กลไกสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ **[33]**

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (250-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดการแตกตัวของเซลลูโลสอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ และเกิดการสลายตัวแข่งกันของปฏิกิริยาดิพอลิเมอไรเซชันกับการไล่น้ำออก (Dehydration) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ตามปฏิกิริยาที่ 1 จะเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (Intermediate) ทำให้เกิดการไล่น้ำออกและเกิดชาร์ขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ 2 และ3 ที่มีอุณหภูมิต่ำส่วนปฏิกิริยาที่ 2 จะมีการแลกเปลี่ยนอิออนระหว่างพันธะไกลโคซิดิค (Tranglucosylation) ทำให้เกิดเลโวกลูโคซานขึ้น โดยกลไกที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย 2 กลไกคือ กลไกแรกจะเป็นการแตกพันธะกลูโคซิดิคแบบโฮโมไลติค (Homolytically) และเกิดการดีพอลิเมอไรเซชัน (Depolymerization) ตามกลไกของอนุมูลอิสระ (Free radical) กลไกที่สองจะมีการแตกพันธะแบบเฮเตอโรไลติค (Heterrolytically) และเกิดการดิพอลิเมอไรเซชันของผลิตภัณฑ์ขั้นกลางของคาร์บอเนียมอิออน (Carbonium ion) ในปฏิกิริยาที่ 3 เป็นการเกิดฟิชชัน (Fission) และการไม่เป็นสัดส่วนกัน (Disproportionation) ปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อปฏิกิริยาเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิ ช่วงเวลาให้ความร้อน บรรยากาศแวดล้อม (ออกซิเจน น้ำ แก๊สเฉื่อย ตัวทำปฏิกิริยาอื่นๆ) องค์ประกอบและธรรมชาติทางกายภาพของชีวมวล



รูปที่ 2.21 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลาง **[33]**

โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกลไกการสลายตัวเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลางเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) โดยกระบวนการของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปฏิกิริยาคายความร้อนของเซลลูโลส **[34]**

Process	**Reaction**	**Entalpy, KJ/Kg-mol carbon convert at**[a]	
		300 K	**1000K**
Methanation	$CO+3H_2 \rightarrow CH_4+H_2O$	-205	-226
	$CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$	-167	-192
Methanol formation	$CO+2H_2 \rightarrow CH_3OH$	-92	-105
	$CO_2+3H_2 \rightarrow CH_3OH+H_2O$	-50	-71
Char formation	$0.17C_6H_{10}O_5 \rightarrow C+0.85H_2O$	-81	-80
Water gas shift	$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$	-42	-33

[a] The standard enthalpy of formation of cellulose was calculate from heat combustion

สำหรับกลไกการเกิดการสลายตัวของโครงสร้างของชีวมวลอันได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 2.22

กลไกการเกิดปฏิกิริยา ฟรีแรดิคอล (Free radical mechanisms) **[35]**

1. ขั้นเริ่มต้น (initiations) เกิดการแตกตัวของโมเลกุลได้ 2 แรดิคอล ภายใต้ปฏิกิริยาอย่างช้า $CH_3CH_3 \longrightarrow 2\ CH_3\bullet$ (2.6)
2. Propagation Hydrogen Abstraction: จะมีการดึง Hydrogen มาจากโมเลกุลอื่นได้ $CH_3\bullet + CH_3CH_3 \longrightarrow CH_4 + CH_3CH_2\bullet$ (2.7)

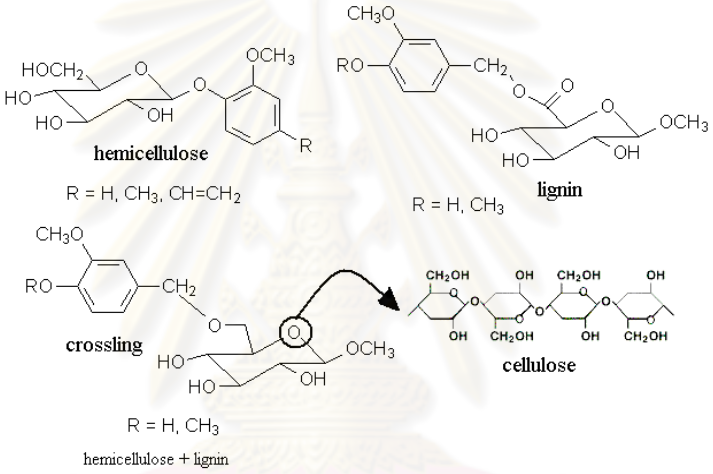
3. Radical Decomposition: free radical เข้าไปในโมเลกุลทำให้เกิดการแยกสลายได้เป็นอัลคีน CH3CH2• ⟶ $CH_2=CH_2 + H•$ (2.8)

4. Radical Addition: มี radical จากโมเลกุลอื่นเพิ่มเข้ามาเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติก $CH_3CH_2• + CH_2=CH_2 \longrightarrow CH_3CH_2CH_2CH_2•$ (2.9)

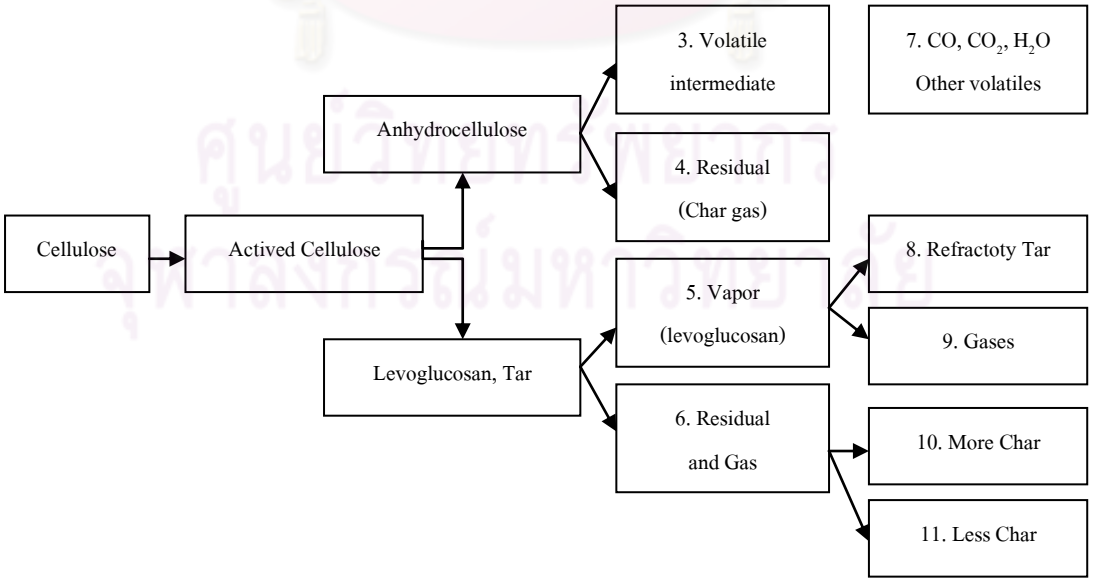
5. Termination: 2 free radical ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่สูญเสีย free radical ไป ทำให้เกิดปฏิกิริยา

Recombination: $CH_3• + CH_3CH_2• \longrightarrow CH_3CH_2CH_3$ (2.10)

Disproportionation: $CH_3CH_2• + CH_3CH_2• \longrightarrow CH_2=CH_2 + CH_3CH_3$ (2.11)



รูปที่ 2.22 รูปแสดงกลไกการแตกตัวขององค์ประกอบชีวมวล



รูปที่ 2.23 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง

ช่วงอุณหภูมิสูง (> 500 องศาเซลเซียส) กลไกการเกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงเป็นไปตามรูปที่ 2.23 เมื่อความดันสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 6 ได้ถ่านชาร์ ในขณะที่การเกิดสารระเหยได้ผ่านปฏิกิริยาที่ 3 และ 5 จะต้องใช้ความดันต่ำลง การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง **[33]**

2.9.2.2 เฮมิเซลลูโลส

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

2.9.2.3 ลิกนิน

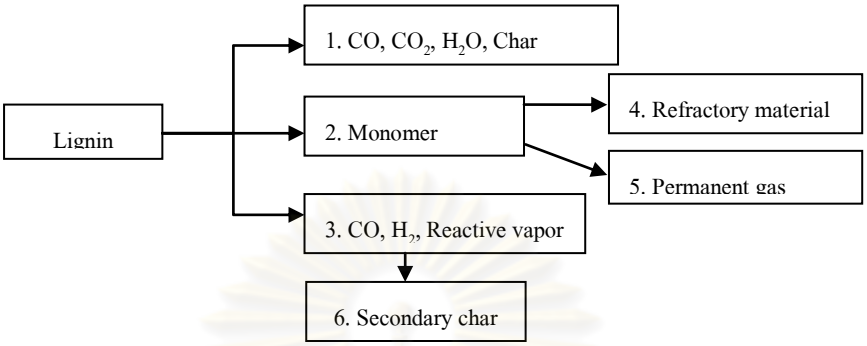
ลิกนินเป็นโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างต่าง ๆ มาประกอบรวมกันจึงทำให้มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้หลายทางที่จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้โดยการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญแสดงได้ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งชนิดของชีวมวลและภาวะที่ใช้ในการทดลองจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก โครงสร้างของปฏิกิริยาเหล่านี้จะคล้ายกับการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลส

ช่วงอุณหภูมิต่ำ (< 240 องศาเซลเซียส) จะเกิดปฏิกิริยาการไล่น้ำออกตามปฏิกิริยาที่ 1 แล้วเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล ทำให้ได้ถ่านชาร์และแก๊สมากขึ้น

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (240-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดลิกนินโนโมโนเมอร์ขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2 โดยที่อัตราการให้ความร้อนสูงและความดันต่ำจะทำให้เกิดโมโนเมอร์ของลิกนินได้ดี

ช่วงอุณหภูมิสูง (> 500 องศาเซลเซียส) แบ่งการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 2 พวกคือ โมโนเมอร์ต่างๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ 2 จะเริ่มมีการแตกตัวในวัฏภาคไอและเกิดการไพโรไลซิสตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 การควบแน่นของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำตามปฏิกิริยาที่ 4 จะได้วัสดุทนไฟและสารที่ควบแน่นได้ขึ้นในขณะที่การแตกตัว (Cracking) ของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิสูงกว่าตามปฏิกิริยาที่ 5 จะได้พวกแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เมื่อถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะเกิดปฏิกิริยาที่ 3 และ 6 และเมื่อเกิดการควบแน่นของสารที่เหลืออยู่ในไอในภาวะ

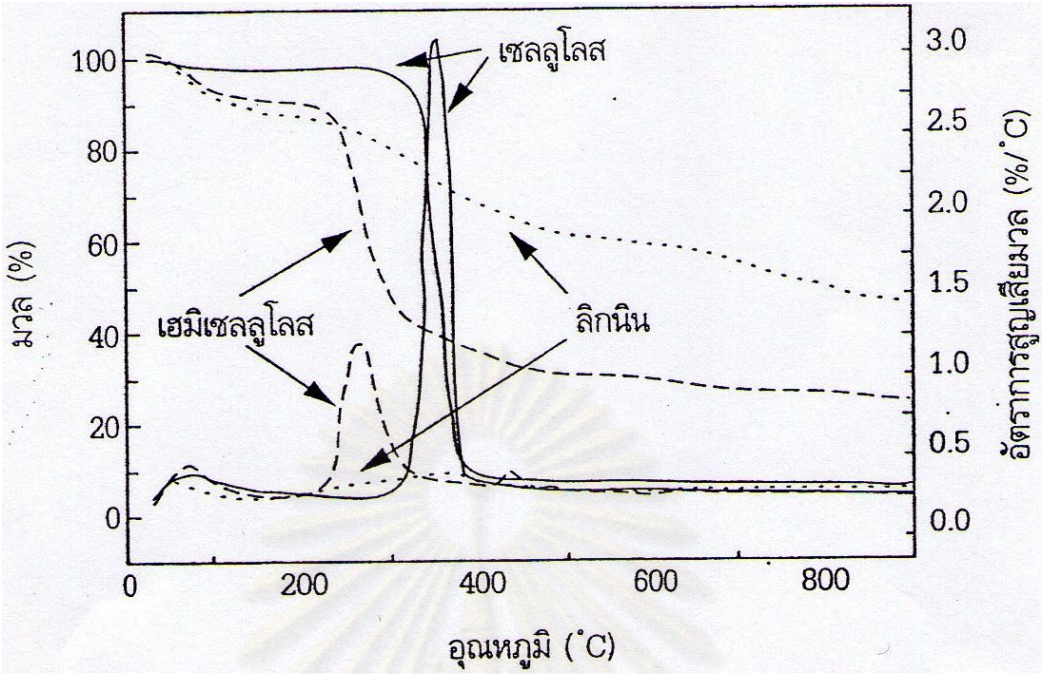
อิ่มตัวยิ่งยวดจะเกิดถ่านชาร์ขึ้น ซึ่งการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวตามปฏิกิริยาที่ 3 และได้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่สูง



รูปที่ 2.24 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน

2.9.2.4 การไพโรไลซิสชีวมวล

พฤติกรรมของชีวมวลระหว่างที่เกิดการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับพฤติกรรมขององค์ประกอบหลักของชีวมวล รูปที่ 2.25 แสดงถึงการวิเคราะห์ TGA (Thermogravimetry) ขององค์ประกอบของชีวมวล ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสของชีวมวลมาจากการรวมตัวกันแบบเชิงเส้นของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแต่ละองค์ประกอบแยกกัน โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นแหล่งหลักของการเกิดสารระเหยและน้ำมันดิน ในขณะที่ลิกนินเป็นแหล่งหลักของการเกิดถ่านชาร์ ชีวมวลจะสลายตัวออกเป็นผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิต่างๆ พร้อมกันโดยปฏิกิริยาปฐมภูมิและผลิตภัณฑ์เหล่านี้หลายๆ ส่วนจะเกิดปฏิกิริยาอื่นต่อไปได้อีก ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากการแตกตัวในปฏิกิริยาปฐมภูมิและจากปฏิกิริยาขั้นสอง ผลของปฏิกิริยาลำดับต่อมาจะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ ปริมาณของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสของชีวมวล ถ่านชาร์ น้ำมันชีวภาพ และแก๊ส ขึ้นอยู่กับภาวะในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง และมีระยะเวลาที่แก๊สอยู่ในปฏิกิริยานาน จะส่งเสริมให้เกิดการสลายตัวของน้ำมันชีวภาพและจะได้แก๊สออกมามาก ปริมาณของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพจะเพิ่มสูงขึ้นได้ด้วยการใช้อุณหภูมิปานกลางระหว่าง 450 – 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนสูงเกิดขึ้นเร็ว และมีระยะเวลาที่แก๊สทำปฏิกิริยาสั้น



รูปที่ 2.25 การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิดในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ

2.9.2.5 ชนิดของเตาปฏิกรณ์

ตามปกติเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสำหรับชีวมวลจะแบ่งออกได้ตามวิธีการที่ชีวมวลเคลื่อนที่ผ่าน ดังนี้

ชนิด A: ไม่มีการเคลื่อนที่ของชีวมวลในเตาปฏิกรณ์ระหว่างกระบวนการ เช่น ไพโรไลซิสเป็นแบบแบตช์ (Batch reactor)

ชนิด B: เชื้อเพลิงขยับเคลื่อนตัวจากแรงทางกล เช่น การหมุนเกลียวในเตาหมุน

ชนิด C: เชื้อเพลิงเคลื่อนตัวจากการไหลของชั้นของไหล (Fluidized bed)

ชนิด D: เชื้อเพลิงไหลไปกับกระแสแก๊สร้อน (Entrained bed) หรือแบ่งประเภทเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสโดยวิธีการให้ความร้อนต่อชีวมวล

ชนิด 1: บางส่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลถูกเผาไหม้ภายในเตาปฏิกรณ์เพื่อให้ความร้อนในการเกิดถ่านกับชีวมวลที่เหลือ

ชนิด 2: การให้ความร้อนโดยตรงถ่ายเทจากแก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิสหรือเชื้อเพลิงอื่นๆ ภายนอกเตาปฏิกรณ์เข้ามาสัมผัสชีวมวล

ชนิด 3: การให้ความร้อนโดยตรงถ่ายเทจากวัตถุเฉื่อยร้อน เช่น แก๊สร้อน ทรายร้อนที่ไม่ทำปฏิกิริยาโดยป้อนเข้าผสมภายในเตาปฏิกรณ์

ชนิด 4: การให้ความร้อนทางอ้อมโดยถ่ายเทผ่านผนังเตาปฏิกรณ์ เช่น จากการเผาไหม้ภายนอก

2.10 ผลกระทบตัวแปรต่างๆต่อการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่างๆ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการไพโรไลซิสดังจะอธิบายต่อไปนี้ **[36]**

2.10.1 องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่างๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะมีการแตกตัวของโพลิแซคคาไลที่สายเชื่อมกลูโคสิดิค (Glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันชีวภาพที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และถ่านชาร์จำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นชาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วน

ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะเป็นสิ่งกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณถ่านชาร์และเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยตรง

2.10.2 อุณหภูมิในการไพโรไลซิส (Temperature)

ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ขั้นคือ ขั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200–300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำเป็นส่วนใหญ่ ขั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง 300–500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวที่ปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ขั้นที่สามอุณหภูมิระหว่าง 500–800 องศาเซลเซียส จะมีการไล่แก๊สออกอีกเป็นครั้งที่สองพร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

การศึกษาอุณหภูมิในการไพโรไลซิสไม้ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าเริ่มเกิดการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสการเกิดระเหยของสารระเหยต่างๆร้อยละ 75 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาการไพโรไลซิสทั้งในด้านปริมาณและ

องค์ประกอบสารระเหยได้ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้น ปริมาณถ่านชาร์ลดลงและปริมาณแก๊สมากขึ้น **[37]**

นอกจากนี้การศึกษาการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ได้แก๊สเพิ่มมากขึ้นสมบัติของน้ำมันชีวภาพจะมีโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เพราะการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้นด้วย เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นที่สองเพิ่มมากขึ้น เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและไฮโดรเจนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นส่วนไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นจะลดลง ทำให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ที่ได้ลดลงและมีการสะสมของคาร์บอน โดยการแตกตัวของสารระเหยบนพื้นผิวถ่านชาร์ที่ร้อน โดยปริมาณชาร์ไม่เกิดขึ้นมากในปฏิกิริยาขั้นต้น และแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้ (Non-condensable gas) มาจากการหลอมเหลวในขั้นแรกโดยไม่ผ่านถ่านชาร์ **[38]** นอกจากนี้สารระเหยที่ได้ออกมามีปริมาณที่ไม่มากนัก และแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและสารประกอบออกไซด์ของคาร์บอน หลังจากนั้นปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นที่สองที่เกิดขึ้นเป็นแกสิฟิเคชั่น ปล่อยแก๊สที่ไม่ควบแน่นโดยส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปถ่านชาร์ต่อไป

2.10.3 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า 103–105 องศาเซลเซียสต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นถ่านชาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ถ่านชาร์จำนวนน้อยมาก

ในกระบวนการไพโรไลซิสถ้าอัตราการให้ความร้อนที่เร็วเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้มีมาก ปริมาณถ่านชาร์น้อย และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นและของเหลวมากกกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้น **[39]** และโมเลกุลของน้ำมันชีวภาพที่อยู่ในภาวะแก๊สมีช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสั้นมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเกิดปฏิกิริยาน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้ายไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิและเวลาในการสลายตัวของน้ำมันชีวภาพน้อยทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและสมบัติของน้ำมันชีวภาพ จึงทำให้ได้น้ำมัน

ชีวภาพ มีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก แต่ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลง โดยอัตราเร็วในการเกิดแก๊สแต่ละชนิดไม่แตกกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อนเนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบการทดลอง **[40]**

นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสในการเกิดถ่านชาร์ของชีวมวลมากกว่าถ่านหิน เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณเซลลูโลสสูง อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสของเซลลูโลส โดยเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่นของเซลลูโลสและเกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชั่นของเซลลูโลส โดยเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลลูโลสที่มีความอยู่ตัวมากขึ้นและได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้น แต่ถ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยอัตราการให้ความร้อนก็จะมีผลต่อปฏิกิริยาน้อยเพราะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก

2.10.4 ขนาดของอนุภาค (Particle size)

ขนาดของอนุภาคมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) คือ ขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นผิวที่สูง (Surface area) ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไปเมื่อเกิดการสลายตัวขั้นแรกจะสลายตัวต่อไปยังขั้นที่สอง (Secondary cracking) ได้รวดเร็วมากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น แต่โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จากอนุภาคขนาดเล็กจะให้ผลมากกว่าจากอนุภาคขนาดใหญ่

2.10.5 ความดัน (Pressure)

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

2.10.6 ภาวะบรรยากาศ (Atmosphere)

ภาวะบรรยากาศของปฏิกิริยาการไพโรไลซิสที่แตกกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาไพโรไลซิสในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนหรือที่เรียกว่าไฮโดรไพโรไลซิส (Hydropyrolysis) สามารถเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยได้ และช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้

2.10.7 เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Residence time)

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนมีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนน้อยเกินไปการสลายตัวก็จะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนมากเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของแก๊สเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสารระเหยต่างๆ จะเกิดการแตกตัวขั้นที่สองต่อไปอีก และปริมาณถ่านชาร์จะมีแนวโน้มของร้อยละคาร์บอนในองค์ประกอบลดลง เนื่องจากสารระเหยมีปริมาณลดน้อยลงนั่นเอง

2.10.8 อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas)

อัตราการไหลของแก๊สตัวพามีผลต่อปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพามีค่าสูงจะทำให้แก๊สตัวพาขจัดสารระเหยต่างๆออกจากห้องเผาไหม้ได้เร็วขึ้นการเกิดปฏิกิริยาอาจไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ปริมาณที่เป็นน้ำมันชีวภาพลดน้อยลงและถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่ำเกินไปทำให้สาระเหยต่างๆอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นการแตกตัวขั้นที่สองเกิดนานได้สารประกอบที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ลดน้อยลง

2.11 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยองค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและเครื่องแมสสเปกโตมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ **[41]**

2.11.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

ผลิตภัณฑ์ของแข็งจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2.11.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนพทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C_5–C_6 ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (Light oil) ช่วงอุณหภูมิ <200 ^{0}C ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอีน เอทิลเบน ซีน
- น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 – 250 ^{0}C ได้แก่ ฟีนอล ไพริดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 ^{0}C ได้แก่ ไดเมททิล แนพทาลีน
- น้ำมันแอนทาซีน (Anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 ^{0}C ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีแนพทีน
- พีทช์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิ >350 ^{0}C ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (Red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

2.11.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์โดยแก๊สอนินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้นโดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์และมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า แก๊สที่เผาไหม้ได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนียในปริมาณเล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.12 การผลิตน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพสามารถผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลแบบเร็ว ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เชิงพลังงานความร้อน ไฟฟ้า เชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ เตาเผา เครื่องยนต์ หรือเครื่องกังหันก๊าซได้ หรือเป็นสารตั้งต้นการผลิตเคมีภัณฑ์อื่นๆ ได้ เช่น สารเติมแต่งรสอาหาร เรซิน เคมีเกษตร ปุ๋ย และสารควบคุมมลพิษ เป็นต้น

2.12.1 น้ำมันชีวภาพ

2.12.1.1 ลักษณะทั่วไป

น้ำมันชีวภาพ (Bio – oil) 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) **[42]** ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบรวดเร็วโดยการแตกสายโซ่โพลิเมอร์ (Depolymerizing) ของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นแก๊สและผ่านการควบแน่นเป็นของเหลวเป็นน้ำมันเบา (Light oil) และน้ำมันหนัก (Heavy oil) น้ำมันไพโรไลซิสเกิดขึ้นจากการแตกตัวทางความร้อนและการลดระดับเชิงพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามด้วยการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วเพื่อแช่แข็งปฏิกิริยาขั้นกลางให้ได้สารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างนี้ โดยไม่ให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวต่อหากมีเวลามากขึ้น น้ำมันดิบชีวภาพจึงมีสารเคมีที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงเป็นองค์ประกอบมากมาย ทำให้มีสมบัติที่โดดเด่นและไม่ธรรมดา ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพขึ้นอยู่กับภาวะของกระบวนการไพโรไลซิส โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายน้ำได้ มีสารอินทรีย์ที่มีประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 75 – 80 โดยมวล และอีกร้อยละ 20 – 25 เป็นน้ำ (ดังตารางที่ 2.10) น้ำมันชีวภาพมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 45 – 50 โดยมวล ซึ่งอยู่ในสารประกอบมากกว่า 300 ชนิดที่พบในน้ำมันดิบชีวภาพ

ในเชิงเคมีน้ำมันไพโรไลซิสเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนระหว่างน้ำ กูไออาคอน (Guaiacols) คาเทคอล (Catecols)ไซริงกอล (Syringols) วานิลลิน (Vanillins) ฟูรานคาร์บอกซัลดีไฮด์ (Furancarboxaldehydes) ไอโซยูจีนอล (Isoeugenol) ไพโรนส์ (Pyrones) กรดแอซิติก กรดฟอร์มิกและกรดคาร์บอกซิลิกอื่นๆ และสารประกอบกลุ่มหลักๆ เช่น ไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ ไฮดรอกซีคีโตน น้ำตาล และสารประกอบฟีนอลิกส์ น้ำมันไพโรไลซิสอาจถือว่าเป็นสารประกอบแขวนลอย (Microemulsion) โดยมีสารประกอบโมเลกุลใหญ่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากลิกนินลอยอยู่ในสารละลาย

ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากลิกนินลอยอยู่ในสารละลายซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวของกลุ่มโฮโลเซลลูโลส สารผสมแขวนลอยรักษาความเสถียรได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน และการเกิดนาโนมิเซลและไมโครมิเซล (Nanomicelle, Micromicelle) ในเชิงกายภาพน้ำมันไพโรไลซิสมีผงถ่านขนาดเล็กแขวนลอยอยู่และมีกลุ่มโลหะแอลคาไลเป็นส่วนประกอบ

ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ

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

2.12.1.2 สมบัติของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายได้ในน้ำ เมทานอล และเอทานอล แต่ไม่ละลายในน้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำมันชีวภาพสามารถกักเก็บได้ ปั๊มส่งได้ และสามารถใช้ในการเผาไหม้ได้คล้ายกับน้ำมันปิโตรเลียม โดยสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.11 และในตารางที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไม้กับน้ำมันเตาโดยน้ำมันชีวภาพไม่สามารถระเหยเป็นไอได้หมดในการกลั่น ที่อุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส จะเกิดการทำปฏิกิริยาในตัวเอง ได้กากของแข็งออกมาเป็นจำนวนมาก อาจถึงร้อยละ 50 โดยมวลของน้ำมันตั้งต้น และเป็นสารเคมีที่ไม่เสถียร มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติตามเวลา เช่น ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น อาจจะมีการแยกชั้น ความสามารถในการระเหยน้อยลง และมีการฝังตัวของยางเหนียว เป็นต้น ความไม่เสถียรจะเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง ในการใช้งานจึงต้องกักเก็บที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.11 สมบัติด้านเคมีของน้ำมันชีวภาพ

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ
ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15-30
ค่ากรด-เบส	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 (เมกกะจูล/กิโลกรัม)	16-19
ค่าความหนืด (ที่ 50 องศาเซลเซียส) (เซนติสโตก)	40-100
ของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2-1
กากของแข็งจากการกลั่น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สูงกว่า 50

ตารางที่ 2.12 สมบัติทั่วไปของน้ำมันชีวภาพจากไม้เปรียบเทียบกับน้ำมันเตา

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเตา
pH	2.5	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.2	0.9
ค่าความร้อน (MJ/kg)	16-19	40
ความหนืด (cP) ที่ 40 องศาเซลเซียส	30-200	180
จุดไหลเท	-30	-18

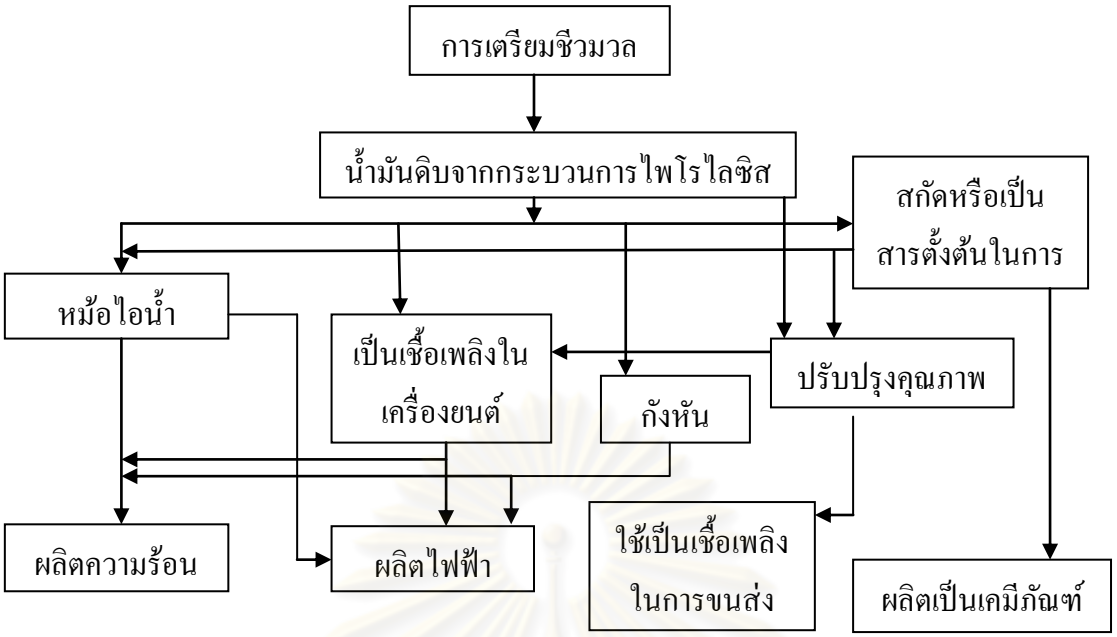
2.12.2 การนำน้ำมันชีวภาพไปประยุกต์ใช้

การผลิตพลังงานความร้อน ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะมีสารประกอบที่มีหมู่ออกซิเจนและส่วนของน้ำ น้ำมันชีวภาพคล้ายกับน้ำมันเบาในด้านสมบัติการเผาไหม้ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในด้านความหนืด ความเสถียร ค่าความเป็นกรด-เบส และระบบการปลดปล่อยแก๊สพิษ เป็นต้น การควบแน่นส่วนของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลสามารถช่วยกำจัดน้ำได้และทำให้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยน้ำมันชีวภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ (ดังรูปที่ 2.26) ได้ดังต่อไปนี้

- การผลิตแก๊สสังเคราะห์ ชีวมวลและน้ำมันชีวภาพสามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นไฮโดรคาร์บอนสะอาดได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ชีวมวลแข็งและการใช้ น้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ พบว่าหากต้องการผลิตแก๊สสังเคราะห์ในปริมาณมากจากชีวมวลบางชนิดในรูปของของแข็งจะพบปัญหาของปริมาณเถ้าสูง แต่เมื่อใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนซึ่งมีปริมาณเถ้าต่ำจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้และการขนส่งน้ำมันชีวภาพสามารถใช้อุปกรณ์และพาหนะที่ใช้ขนส่งน้ำมันปิโตรเลียมได้ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่ากรณีการขนส่งชีวมวลในรูปของแข็ง การแกสิฟิเคชันของน้ำมันชีวภาพโดยใช้ออกซิเจนร่วมทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปส์ได้

- นอกจากนี้น้ำมันชีวภาพยังศักยภาพในการผลิตแก๊สสังเคราะห์หรือแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีเมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลแข็ง โดยน้ำมันหรือน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อน 4.5-5.5 กรัมต่อชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30 มล./นาที ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สามารถแปรรูปเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ถึงร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สดังกล่าวประกอบด้วยแก๊สสังเคราะห์ร้อยละ 16-36 โดยโมล มีเทนร้อยละ 19-27 โดยโมล และอีเทนร้อยละ 21-31 โดยโมล และมีค่าความร้อนรวมเท่ากับ 1300-1700 บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุตซึ่งมีค่าสูงกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ชีวมวลแข็งโดยตรง

- การผลิตกระแสไฟฟ้า น้ำมันชีวภาพมีข้อจำกัดในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์โดยตรงเพราะน้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบปั๊มป์และระบบหัวฉีดภายในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมาพบว่าสามารถใช้น้ำมันชีวภาพกับเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล



รูปที่ 2.26 การนำน้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวลไปใช้ประโยชน์

2.13 การผลิตถ่านชาร์

2.13.1 ถ่านชาร์

ถ่านชาร์(Charcoal) เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล มีส่วนประกอบของคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนใหญ่ สารระเหยประมาณร้อยละ 20 – 30 และเศษเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5 – 5 ค่าความร้อนประมาณ 28 – 33 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ถ่านชาร์จากไม้ที่ดีควรรักษาสภาพของเนื้อไม้ไว้ได้ โดยมีสีดำมันเลื่อม เป็นวง แข็งไม่ยุ่ย น้ำหนักเบา สามารถลอยบนน้ำได้ ถ่านชาร์เป็นเชื้อเพลิงชั้นดี เผาไหม้ให้อุณหภูมิสูง ไร้ควัน มีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนมากกว่าแกรไฟต์ นอกจากนี้ถ่านชาร์ยังมีความพรุนในตัว ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวลมาก จึงถูกใช้เป็นตัวดูดซับได้ด้วย

2.13.2 กระบวนการผลิต

การผลิตถ่านชาร์สามารถทำได้หลายวิธี โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วิธีใช้เตาแหล่งความร้อนภายใน โดยที่ความร้อนที่ต้องการในกระบวนการมาจากการเผาไหม้บางส่วนของไม้ฟืนที่จะกลายเป็นถ่าน และวิธีใช้ที่บรรจุที่ได้รับความร้อนจากภายนอก โดยที่ความร้อนที่ต้องการในกระบวนการมาจากแหล่งภายนอกส่งเข้าไปในภาชนะปิดที่บรรจุไม้ฟืนทั้งสองประเภทไว้ ขั้นตอนที่ต้องปฏิบัติในแต่ละกระบวนการจะเหมือนกัน นั่นคือมี 3 ช่วงที่แยกกันคือ การทำแห้ง การไพโรไลซิส และการทำให้เย็น ในทางปฏิบัติเมื่อถ่านถูกผลิตขึ้นในเตาขนาดใหญ่ กระบวนการเหล่านี้จะคาบเกี่ยวกันและเกิดขึ้นพร้อมกันได้

1. ช่วงการทำแห้ง ก่อนที่ไม้ฟืนหรือชีวมวลจะกลายเป็นถ่าน ต้องไล่ความชื้นในเนื้อไม้ออกมาก่อน ซึ่งสามารถทำได้ 2 ขั้นตอนคือ การขับน้ำที่อยู่ในช่องของเนื้อไม้ที่เรียกว่า น้ำอิสระ (free water) ออกมา เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิของเนื้อไม้ประมาณ 110 องศาเซลเซียส ซึ่งยิ่งเนื้อไม้ฟืนเปียกมากเท่าไร ก็จำเป็นต้องใช้พลังงานและเวลามากขึ้นเพื่อขับน้ำออก เมื่อไล่น้ำอิสระในช่องเนื้อไม้ออกหมดแล้ว กระบวนการจะเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้โมเลกุลของน้ำที่ยึดติดหรือดูดซับบนพื้นผิวของโครงสร้างเซลล์เนื้อไม้จะถูกปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่อง จนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึงประมาณ 200 องศาเซลเซียส กระบวนการทำแห้งในเตาถ่านนี้จะเห็นน้ำถูกปล่อยออกมาในรูปของไอน้ำสีขาว ซึ่งเป็นลักษณะที่สังเกตได้ในช่วงแรกของการทำถ่าน

2. ช่วงไพโรไลซิส เมื่อมีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิของเนื้อไม้ชีวมวลจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ที่ประมาณ 280 องศาเซลเซียส กระบวนการแตกตัวทางความร้อนจะเริ่มเกิดขึ้น การสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินส่งผลให้เกิดการปล่อยสารเคมีออกมามากมาย เรียกว่า ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแก๊สหรือไอ จึงเรียกรวมกันว่า “สารระเหย” สารระเหยที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการช่วงนี้ทำให้สีของควันจากเตาเผาถ่านเปลี่ยนเป็นสีเข้มขึ้น และมีกลิ่นแรงของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลออกมาด้วย เมื่อไพโรไลซิสเกิดขึ้น ความร้อนที่ต้องการสำหรับปฏิกิริยาจะลดลงมากเมื่อเทียบกับช่วงการทำแห้ง ฉะนั้นความจำเป็นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงบางส่วนก็ลดลง การป้อนอากาศจะถูกจำกัดในช่วงนี้เพราะต้องการความร้อนน้อย

อุณหภูมิสูงสุดของกระบวนการไพโรไลซิสจะขึ้นอยู่กับขนาดของไม้ฟืน มิติของเตา ปริมาณฉนวนกันความร้อนที่ติดตั้ง อุณหภูมิบรรยากาศภายนอก ปริมาณความชื้นตั้งต้นของไม้ฟืน และปัจจัยอื่นๆ สำหรับเตาผลิตถ่านขนาดเล็กส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 400 – 500 องศาเซลเซียส ในบางเตาที่มีขนาดใหญ่ อุณหภูมิอาจสูงถึง 600 – 700 องศาเซลเซียสได้ อุณหภูมิที่สูงกว่านี้อาจจะต้องใช้เตาปฏิกรณ์ประเภท รีทอร์ต (Retort) ระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลจะมีการสูญเสียปริมาตรอย่างมาก อาจจะมากถึงร้อยละ 30 – 40 หากวางตามแนวนอนขวางกับแนวลายเนื้อไม้ เพราะมีแนวโน้มว่าน้ำหนักจะลดลง หากวางตามแนวตั้งตามแนวลายเนื้อไม้ปริมาณที่หายไปจะน้อยกว่า

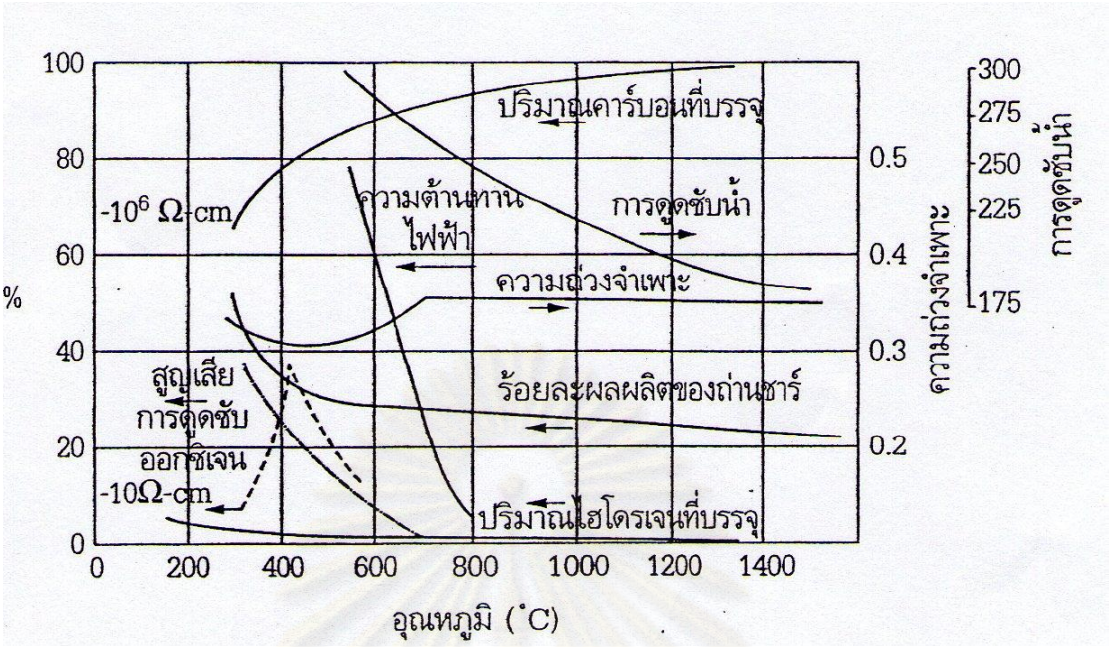
3. ช่วงการทำให้เย็น เมื่อปฏิกิริยาไพโรไลซิสใกล้จะเสร็จสิ้น อุณหภูมิในเนื้อไม้ชีวมวลจะเริ่มลดลง ปริมาณควันที่ปล่อยออกมาจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และสีของควันจะเปลี่ยนไปเป็นสีฟ้าจางๆ ในบางกรณีจะไม่มีควันให้เห็นเลย ในบางครั้งจะเห็นเปลวสีน้ำเงินบางๆเหนือผิวเตา ซึ่ง

เกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิผิวเตาสูงพอที่จะจุดติดในแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือแก๊สอื่นๆ ที่ปล่อยออกมาได้ ในช่วงนี้เตาเผาถ่านต้องปิดสนิทไม่รั่วซึม ถ้าอากาศเล็ดลอดเข้าไปได้โดยที่ถ่านชาร์ยังมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดติดไฟของมันอยู่ก็จะเกิดการเผาไม้ของถ่านจนหมดได้ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเย็นลงถึงระดับหนึ่งแล้ว การขนย้ายถ่านออกจากเตาก็จะต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะจุดที่อุณหภูมิสูงอาจจะยังมีอยู่ภายในเตาและสามารถปะทุเป็นไฟได้หากมีอากาศมาผสม เมื่อขนถ่านออกมาผึ่งกับอากาศ จะผึ่งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อปรับสภาพ ในช่วงเวลานี้ถ่านจะเย็นตัวลงเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ โดยที่สารระเหยบางส่วนอาจจะยังถูกปล่อยออกมาและความชื้นหรือออกซิเจนจะถูกดูดซับเข้าไปในถ่าน ทำให้ไม่มีอันตรายจากการปะทุเป็นไฟขึ้นมาเองของถ่านอีก และพร้อมสำหรับการบรรจุและขนย้ายต่อไป

2.13.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านที่ได้

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของถ่านที่ได้จากการผลิตหนึ่งๆ มีหลายประการ แต่มีปัจจัยที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ อุณหภูมิสูงสุดและปริมาณความชื้นของชีวมวล

1. อุณหภูมิในการทำถ่าน ผลของอุณหภูมิในการทำถ่านต่อปริมาณถ่านที่ได้และสัดส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวแสดงในรูปที่ 2.27 ที่น่าสังเกตคือ เมื่ออุณหภูมิเป็น 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเพียงพอต่อการทำแห้งและเกิดไพโรไลซิสเล็กน้อยเท่านั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะยังมีปริมาณสารระเหยคงค้างอยู่มาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงสุดขึ้นไปปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะลดลง เนื่องจากปริมาณสารระเหยถูกปล่อยออกไปมาก ถ่านชาร์ที่ได้จะมีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นที่ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณถ่านชาร์เป็นร้อยละ 50 มีคาร์บอนคงตัวร้อยละ 73 ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเป็น 600 องศาเซลเซียส ปริมาณถ่านชาร์จะเป็นร้อยละ 30 มีคาร์บอนคงตัวร้อยละ 92 ตัวเลขเหล่านี้ไม่สามารถใช้ทำนายผลที่ได้จากการผลิตถ่านในทางปฏิบัติได้ดีนัก เนื่องจากปริมาณถ่านที่ได้จากการปฏิบัติจริงตามภาวะจริงจะมีค่าต่ำกว่านี้มาก แต่อย่างไรก็ตาม เราก็สามารถใช้เป็นบรรทัดฐานในการผลิตถ่านได้ว่าจะเน้นที่ปริมาณหรือคุณภาพของถ่าน หากต้องการถ่านชาร์ที่มีสัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูง วิธีการที่ใช้จึงจำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ขับสารระเหยออกมาได้มาก ซึ่งจะมีผลให้ปริมาณถ่านที่ได้โดยรวมลดลง สำหรับถ่านที่ใช้ในครัวเรือนอาจมีสัดส่วนสารระเหยมากได้ ซึ่งก็คือจะผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำลงมากและจะได้ปริมาณถ่านมากขึ้น

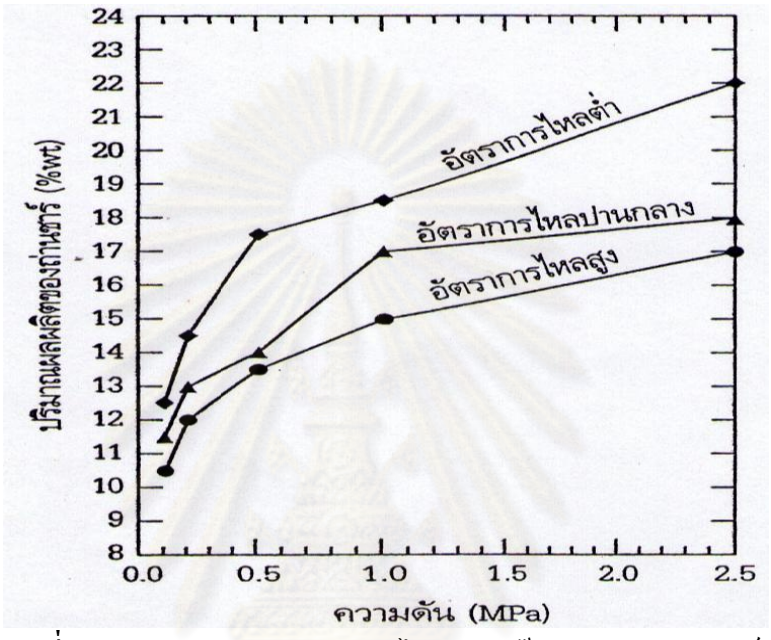


รูปที่ 2.27 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของถ่านชาร์

2. ความดันและอัตราการไหลของก๊าซ ผลของความดันและอัตราการไหลของแก๊สต่อปริมาณถ่านชาร์เป็นดังรูปที่ 2.28 การเกิดถ่านชาร์มาจากปฏิกิริยาปฐมภูมิและปฏิกิริยาขั้นต่อๆมา ซึ่งถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นก่อนอาจเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้น้ำมันชีวภาพแตกโครงสร้างกลายมาเป็นของแข็งได้อีก ปฏิกิริยาของไอสารระเหยที่ออกมานี้ หากมีเวลามากก็จะทำให้มีโอกาสเกิดเพิ่มขึ้น จากรูปที่อัตราการไหลของแก๊สต่ำ ปฏิกิริยาการแตกตัวและเกิดเป็นถ่านชาร์มีเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันที่ความดันต่ำ ปริมาณจะเกิดขึ้นน้อย แต่มีน้ำมันชีวภาพเกิดขึ้นมาก

3. ปริมาณความชื้น ปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ชีวมวลจะมีผลต่อถ่านที่ผลิตได้เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการขับน้ำหรือความชื้นออกมาให้หมด ซึ่งปกติมาจากการเผาไหม้ฟืนบางส่วน หากใช้ไม้สดซึ่งมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 56 จำเป็นต้องใช้ไม้แห้งเผาประมาณร้อยละ17 ของมวลเริ่มต้น หากไม้ฟืนที่นำมาทำถ่านมีความชื้นร้อยละ 17 จะใช้ไม้เพียงร้อยละ3 ของมวลเริ่มต้นเท่านั้นในการทำแห้ง ซึ่งหมายความว่าสามารถประหยัดร้อยละ14 ของไม้ฟืนเริ่มต้นได้ และได้ปริมาณถ่านมากขึ้นหากใช้ไม้ชีวมวลที่แห้ง ซึ่งจะได้ปริมาณเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนกัน นอกจากนี้ปริมาณความชื้นที่มากยังส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดในกระบวนการทำถ่านลดลงและยังยืดเวลาในการทำถ่านให้ยาวนานขึ้นด้วย อิทธิพลของความชื้นต่อการทำถ่านเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อน แต่สรุปได้ว่าหากใช้ไม้ชีวมวลแห้งจะได้ปริมาณถ่านมากขึ้นและเวลาที่ใช้ทำถ่านสั้นลง ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการพิจารณาเพราะเกี่ยวข้องกับราคาการลงทุน ดังนั้นจึงมีความชัดเจนใน

เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ว่าการลดความชื้นในเนื้อไม้ชีวมวลจะเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการทำถ่านทั้งหมด แต่สำหรับการทำถ่านแบบดั้งเดิมที่ต้องการถ่านใช้ในครัวเรือนซึ่งยอมรับถ่านที่มีปริมาณสารระเหยมากได้ กระบวนการที่ใช้ทำถ่านจะใช้อุณหภูมิค่อนข้างต่ำเพื่อให้ได้ถ่านปริมาณมาก หากมีการใช้ไม้สดที่มีความชื้นสูง จะช่วยไม่ให้อุณหภูมิขึ้นสูงมาก มิฉะนั้นปริมาณถ่านที่ได้จะลดลง

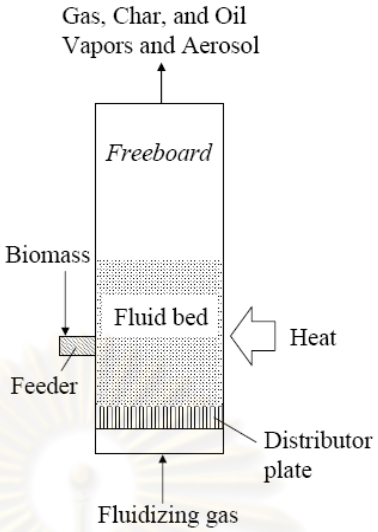


รูปที่ 2.28 ผลของความดันและการไหลของแก๊สต่อการเกิดถ่านชาร์

2.14 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ **[43]** เครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพมี 5 ประเภท ได้แก่

2.14.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor)

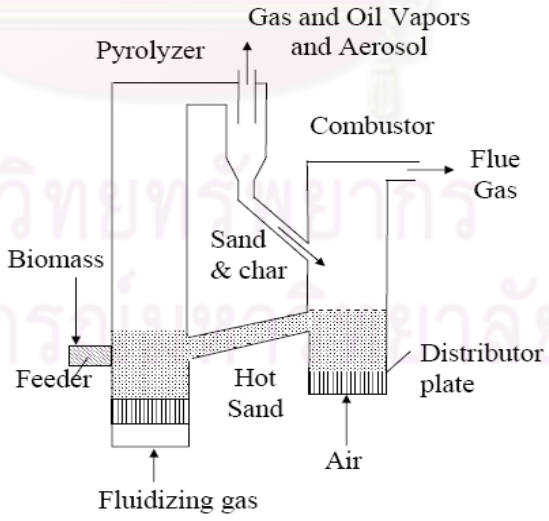
เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ป้อนอากาศจากทางด้านล่างของเบด ความเร็วของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวขึ้นจนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสอย่างสม่ำเสมอ แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้นแล้วแทรกตัวขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ซึ่งขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมานี้จะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย แสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ

2.14.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed)

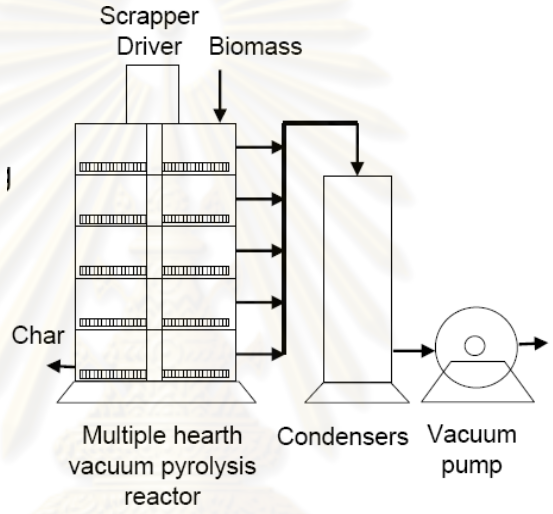
เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสที่สูงขึ้นจนเบดบางส่วนหลุดออกไป ดังนั้นจึงต้องติดตั้งไซโคลนเพื่อนำอนุภาคกลับมาในขณะที่แก๊สไหลผ่านไซโคลนออกไปทางด้านบนและกลับมาป้อนทางล่างเบดอีกครั้งแสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน

2.14.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการสลายตัวของชีวมวลภายใต้การลดความดันและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์นาน ซึ่งไม่เหมือนกับการไพโรไลซิสแบบเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวเป็นไอกับกรณีของการไพโรไลซิสแบบเร็วแล้วจะเกิดได้เร็วเหมือนกันโดยความดันที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 15 กิโลปาสคาล แสดงดังรูปที่ 2.31

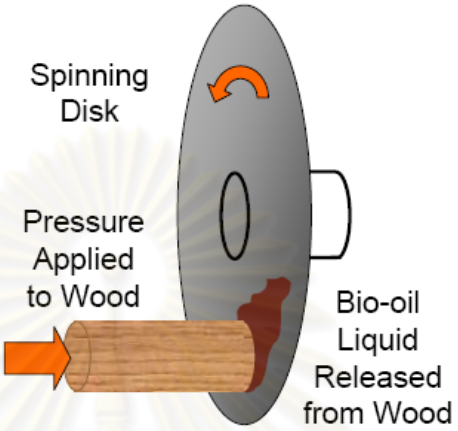


รูปที่ 2.31 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ

2.14.4 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่อนุภาคชีวมวลกระทบหรือเคลื่อนที่ไปชนกับของแข็งซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อน แอบลาทีฟไพโรไลซิสแตกต่างกับการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยวิธีอื่น ๆ โดยมีการจำกัดอัตราการถ่ายโอนความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งต้องใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก วิธีการเกิดฏิกิริยาของแอบลาทีฟไพโรไลซิสคล้ายกับการหลอมเหลวเนยในกระทะ โดยการเคลื่อนที่ของเนยบนพื้นผิวของกระทะที่ร้อนสามารถเพิ่มอัตราการหลอมเหลวของเนยได้ การถ่ายโอนความร้อนอย่างรวดเร็วนี้เกี่ยวข้องกับการสัมผัสกับพื้นผิวที่ให้ความร้อน ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน โดยจุดเด่นของกระบวนการแอบลาทีฟไพโรไลซิส คือ การให้ความดันสูงในการป้อนอนุภาคชีวมวลบนผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่ร้อนซึ่งจะทำ

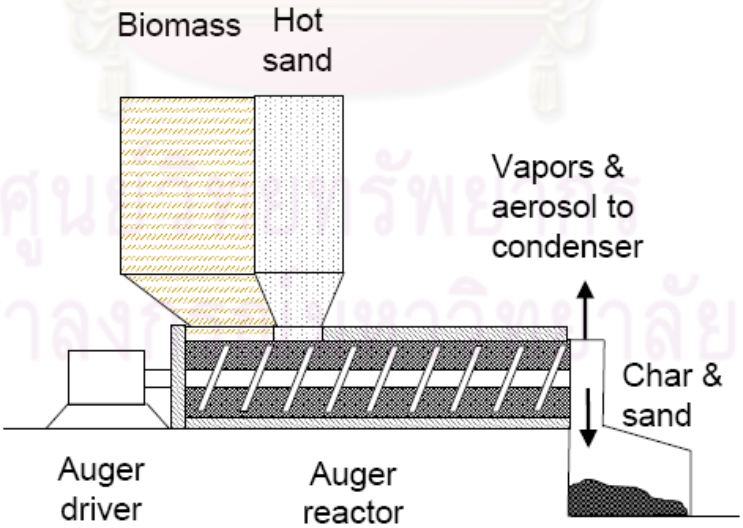
ให้เกิดแรงหมุนเหวี่ยงหรือแรงเชิงกล อนุภาคชีวมวลจะเคลื่อนที่ชนกับผนังเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสจึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี แสดงดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบแอบลาทีฟ

2.14.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (Auger reactor)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ใช้แก๊สตัวพาและใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ทำงานแบบต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีหลายแบบหลายขนาดและมีตัวแปรเงื่อนไขในการใช้ที่ไม่เหมือนกัน เช่น ขนาดอนุภาค ลักษณะเฉพาะตัวเครื่อง หรือเทคโนโลยีที่ใช้งานง่าย ราคาที่แตกกต่างๆกัน

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

F. Ats และคณะ **[44]** ศึกษาการไพโรไลซิสต้นงาด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูไดซ์เบดนิ่ง ทำการวิเคราะห์หาผลของอุณหภูมิ ขนาดของอนุภาคสารตัวอย่าง อัตราการให้ความร้อนและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (N_2) อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 400 – 700 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาคที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.224 – 1.8 มิลลิเมตร อัตราความร้อนอยู่ระหว่าง 100 – 700 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจน อยู่ระหว่าง 50 – 800 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยที่ค่าปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดมีค่าร้อยละ 37โดยน้ำหนัก ที่ 550 องศาเซลเซียส อัตราความร้อน 500 องศาเซลเซียสต่อนาที และ อัตราการไหลผ่านของก๊าซไนโตรเจน มีค่า 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยพบว่าขนาดของอนุภาคที่แตกต่างทั้ง 4 ขนาดนั้นแทบจะไม่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันจะทำการวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ IR และ H-NMR สเปกโตรสโครฟี

Jale Yanik และคณะ **[45]** ศึกษาเกี่ยวกับการไพโรไลซิสของเสียที่เกิดจากการเกษตร (ซังข้าวโพด, ฟางข้าวและต้นกระเพรา) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูไดซ์เบด ได้ปริมาณของถ่านชาร์ ของเหลว และแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ของการไพโรไลซิสจะแยกออกเป็น 2 สถานะได้แก่ สถานะที่เป็นน้ำ และน้ำมัน ปริมาณน้ำมันที่ได้มีค่าประมาณร้อยละ 35 – 41 ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลแต่ละชนิด โดยทั้งหมดจะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์โครมาโทรกราฟฟี – แมสสเปกโทรเมทรี่(chromatography–mass spectrometry) นอกจากนี้ ยังสามารถสามารถวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของน้ำมัน องค์ประกอบทางเคมีของแก๊สและผลิตภัณฑ์ชาร์ที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ได้

Nakorn และคณะ **[46]** ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของฟางข้าว แกลบและซังข้าวโพด โดยใช้เทคนิค TG-MS ซึ่งให้ความสนใจกับแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส น้ำหนักที่หายไปและอัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จะต่างกันถึงแม้ว่าสารตัวอย่างนั้นจะมีองค์ประกอบของธาตุเหมือนกัน พบว่าจะได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลักในทุกๆตัวอย่าง โดยอัตราการเกิดแก๊สของสารตัวอย่างแต่ละตัวจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน ซึ่งพบว่าเซลลูโลสและลิกนินจะทำปฏิกิริยากันระหว่างการเกิดไพโรไลซิส ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ลดลง แต่ปริมาณถ่านชาร์เพิ่มขึ้น จากข้อมูลของแก๊สที่ได้และการวิเคราะห์ถ่านชาร์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าองค์ประกอบทั้ง

สองสามารถลดน้ำมันชีวภาพในกระบวนการไพโรไลซิสได้ อันเนื่องมาจากผลของการเกิดปฏิกิริยา cross-link ระหว่างเซลลูโลสและ ลิกนินไปเป็นน้ำและหมู่เอสเทอร์ในกระบวนการไพโรไลซิส

Ayse E. Putun และคณะ **[47]** ศึกษาถึงภาวะการไพโรไลซิสของฟางข้าวที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อัตราความร้อน 5 องศาเคลวินต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้ขนาดของอนุภาค อัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของกระแสไอน้ำ ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 673, 773, 823 และ 973 องศาเคลวิน ที่อุณหภูมิ 823 องศาเคลวินให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ร้อยละ 27.26 ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.425-0.85 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ร้อยละ 27.77 อัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ความเร็วของไอน้ำอยู่ที่ 2.7 เซนติเมตรต่อวินาที

Zheng Ji-lu และคณะ **[48]** ไพโรไลซิสต้นฝ้ายแบบเร็วที่อุณหภูมิ 480 ถึง 530 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูไดซ์เบด ได้น้ำมันชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ผลการทดลองได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ร้อยละ 55 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี แมสสเปกโทรเมทรี-แก๊สโครมาโทรกราฟฟี พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยน้ำ กรด และสารประกอบเฮทเทอโรไซคลิก วิเคราะห์ค่าความร้อนอยู่ที่ 17.77 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม สภาพคงตัว การละลายและการกัดกร่อนมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซล สามารถนำไปใช้การเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ หรือ เตาเผา หรือนำไปกลั่นแยกใช้ในยานพาหนะ นอกจากนี้ทำการปรับปรุงระบบในการไพโรไลซิสโดยมีตัวป้อนสารสองชั้นเพื่อป้องกันการอุดตันทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Nurfgül Özbay และคณะ **[49]** ศึกษาการไพโรไลซิสของเนื้อของแอปริคอท (Apricot pulps) ในระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิ อัตราการไหลผ่านของแก๊สและความเร็วของไอของปริมาณผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อัตราความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 300 – 700 องศาเซลเซียส โดยที่ 500 องศาเซลเซียสจะได้ค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด ซึ่งปริมาณของเหลวขึ้นอยู่กับแก๊สไนโตรเจนและไอ ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส

วิทยา ปั้นสุวรรณ **[50]** ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของเมล็ดสบู่ดำที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 20 นาที ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS โดยการเทียบกับโปรแกรมสืบค้นสารเคมี ผลการวิเคราะห์พบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการไพโรไลซิสคือ สารประกอบ อัลเคน และสารประกอบอัลคีน นอกจากนี้ยังมีสารประกอบของกรดอินทรีย์ สารประกอบไนตริล สารประกอบอัลคิลเบนซิน สารประกอบเอสเทอร์ และสารประกอบแอลกอฮอล์ เกิดขึ้นในปริมาณน้อย ซึ่งถูกตรวจพบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากไพโรไลซิส

Lu Qiang และคณะ **[51]** ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพน้ำมันชีวภาพที่ได้จากแกลบ ศึกษาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 550 องศาเซลเซียส โดยได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 50 อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดยวิธี อินดักทีฟ-คัพเปิลพลาสมา อะตอมมิก แอบซอร์บชัน สเปกโทรเมตรี วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่าจะประกอบไปด้วยสารต่างๆมากกว่า 50 ชนิด เช่น กรด แอลกอออล์ คีโตน ฟีนอล เอสเทอร์ อัลดีไฮด์ ฟูราน และเมื่อทดสอบสมบัติพื้นฐาน ความหนืด การคงสภาพ การหล่อลื่น การสึกหรอ จะมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

ธนิฎา ฤกษ์หิรัญโชติ และคณะ **[52]** งานวิจัยมุ่งศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสหญ้าคา โดยศึกษาการสลายตัวของหญ้าคา ด้วยเครื่อง TGA พบว่าช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของหญ้าคาที่ มากที่สุดอยู่ในช่วง 200-380 องศาเซลเซียส และค่าปริมาณความชื้นของหญ้าคามีค่าร้อยละ 10 โดยใช้ปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อุณหภูมิสุดท้ายของการไพโรไลซิสคือ 400 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อน 1.6 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เมื่อทำการไพโรไลซิสหญ้าคา พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเท่ากับ 39.3

M. Asadullah และคณะ **[53]** ศึกษาการไพโรไลซิสของกากชานอ้อยในระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยศึกษาที่อุณหภูมิต่างกันในช่วง 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส น้ำมันชีวภาพที่ได้เก็บที่คอนเดนเซอร์ สองส่วนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ได้ร้อยละ 66 แก๊สที่ไม่สามารถระเหยได้จะประกอบไปด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน โพรเพนและโพรพีน ความหนาแน่นและความหนืดอยู่ที่ 1130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 19.32 เซนติพอยส์ สำหรับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากส่วนที่หนึ่งและ 1050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 4.25 เซนติพอยส์ สำหรับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากส่วนที่สอง ค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 17.25 pH 3.5 และ 19.91 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม pH อยู่ที่ 4.5 ตามลำดับ

สินีนาฎ รอดจีน **[54]** ศึกษาการไพโรไลซิสของชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูไดซ์เบดแบบหมุนเวียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไรเซอร์ 2.5 เซนติเมตร สูง 165 เซนติเมตร โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 650-850 องศาเซลเซียส ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมช่วง 0-100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ช่วง 1-5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาช่วง 5-9 พบว่าเมื่อร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสม ร้อยละของปฏิกิริยาที่ใช้ และร้อยละนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนแก๊สมีเทนลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะที่ภาวะอุณหภูมิเหมาะสมคือ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมเท่ากับ 100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เท่ากับ 5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 9 โดยได้ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 52.0 และ 18.0 ตามลำดับ

Lee และคณะ **[55]** ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาการปรับสภาพ และระบบการกำจัดถ่านชาร์ต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุด คือ 410-510 องศาเซลเซียส น้ำมันชีวภาพที่ได้มีปริมาณโลหะอัลคาไลต่ำ โดยส่วนใหญ่จะติดออกมาจากการกำจัดถ่านชาร์และการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นจะเพิ่มการลดปริมาณโลหะอัลคาไล การปรับสภาพทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีความบริสุทธิ์ ปลอดภัยและเพิ่มมูลค่าได้ง่าย น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น น้ำมันดีเซลหรือเชื้อเพลิงในการพัฒนา โดยสามารถใช้โดยตรงหรือผสมกับเชื้อเพลิงทางการค้า ข้อดีของการประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีกำมะถัน ผลิตภัณฑ์แก๊สหลักที่ได้ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนที่อุณหภูมิสูงปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและแก๊สอื่น ๆ รวมถึงค่าความร้อนจะสูงขึ้น และผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 15 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยสามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานหรือใช้เป็นตัวดูดซับแก๊ส ได้แก่ แอมโมเนีย

Lu และคณะ **[56]** ศึกษาสมบัติเชิงเคมีและสมบัติเชิงกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสเปลือกข้าวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและธาตุอนินทรีย์ การไหลจะเป็นการไหลแบบไม่เป็นนิวโตเนียน น้ำมันชีวภาพไม่เสถียรต่อความร้อน การเติมเมทานอลจะเพิ่มความเสถียรกับน้ำมันชีวภาพมีบริมาณน้ำ ของแข็งและเถ้าสูง มีสมบัติในการกัดกร่อน มีความเป็นพิษ และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการเพิ่มประสิทธิภาพก่อนนำไปใช้จริง

Su และคณะ **[57]** ศึกษาการไพโรไลซิสของฟางข้าวและกากไม้ไผ่โดยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดที่ประกอบด้วยระบบแยกถ่านชาร์ และศึกษาถึงอิทธิพลของปฏิกิริยาที่ภาวะต่างๆที่มีต่อผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของระบบการแยกถ่านชาร์ ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพได้ทำการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 415-540 องศาเซลเซียส สำหรับฟางข้าว และช่วงอุณหภูมิ 350-510 องศาเซลเซียสสำหรับกากไม้ไผ่ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง และชนิดของแก๊สตัวพา ผลการวิจัยพบว่า ช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพคือ 440-500 องศาเซลเซียสสำหรับฟางข้าว และ 405-440 องศาเซลเซียสสำหรับกากไม้ไผ่ และจากผลการทดลองของกากไม้ไผ่ปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพอยู่ที่มากกว่าร้อยละ 70 ของน้ำหนักกากไม้ไผ่ ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง พบว่าเมื่อให้อัตราของสารป้อนเร็วและขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้ได้ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพมากกว่า และการใช้แก๊สผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สตัวพา จะทำให้ปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพมีมากขึ้น องค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพ ประกอบไปด้วย ฟีนอลิก(Phenolics) เฟอร์ฟูรอล(Furfural)

กรกอะซิติก(Acetic acid) เลโวกลูโคซาน(Levoglucosan) กัวไกลคอล(Guaiacol) อัคคิลกัวไกลคอล (Alkyl guaiacol) คีโตน(Ketones) และอัลดีไฮด์(Aldehydes) นอกจากนี้การทดลองยังสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพคุณภาพสูง ซึ่งมีความเข้มข้นของโลหะแอลคาไลน์ และแอลคาไลน์เอิร์ธต่ำ แสดงให้เห็นระบบแยกถ่านชาร์มีประสิทธิภาพดี

Sensoz และคณะ **[58]** ศึกษาไพโรไลซิสของเมล็ดดอกคำฝอยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ในส่วนของโครงสร้างของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยนำเมล็ดดอกคำฝอยอัดเป็นแผ่นเค้กขนาด 1.8 มิลลิเมตร ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ความร้อน 10, 30, 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่บรรยากาศออกซิเจน และ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ภาวะแก๊สไนโตรเจน ได้เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 36.84, 36.42, 36.84 และ 36.00 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนทำให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 1.50, 1.32, 1.55 สูงกว่าแก๊สไนโตรเจนที่มีค่าเท่ากับ 1.13 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Catalytic reforming ของแอลกอฮอล์และสารอะโรมาติกที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ให้เปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อนำน้ำมันชีวภาพมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟ พบว่ามีส่วนที่เป็น Asphaltenes ร้อยละ 50-62.5 และ n- Pentane soluble ร้อยละ 37.5-50.0 โดยน้ำหนัก ยังมีส่วนที่เป็นโทลูอีนและเมทานอล จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีหมู่ของ O-H stretching ที่ช่วง 3200 และ 3400 cm^{-1} C=O stretching ที่ช่วง 1700 และ 1750 cm^{-1}ของหมู่คีโตนและหมู่อัลดีไฮด์ จากการวิเคราะห์ทางเทคนิค ^{1}H NMR พบ Aromatic hydrogen resonance ในช่วง 6.5-9.0 พีพีเอ็ม และ Aliphatic hydrogen resonance 0.5-6.5 พีพีเอ็ม จากการวิเคราะห์ทางเทคนิคแก๊สโครมาโทรกราฟ พบ C_{15}-C_{36} ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1079 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความหนืดเท่ากับ 225 เซนติสโตกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และมีจุดวาบไฟ 58 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือ

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1.1. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ

เครื่องมือบดชีวมวลแบบหยาบ (Wood chipper) ยี่ห้อ KMAC รุ่น 3801 ของบริษัท เค.แมชชีน ขนาด 2 hp, 380 Volt, 50 Hz จะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการบดฟางข้าวในช่วงแรกเพื่อให้ฟางข้าวมีขนาดที่เล็กลง ดังรูปที่ 3.1 (ก) แต่ฟางข้าวที่ผ่านเครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบยังไม่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสได้

3.1.1.2. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด

เครื่องมือบดชีวมวลแบบละเอียด ของ Retsch GMBH wesa-Germany รุ่น 5657 HAAN Type SK1, 1100 watt, 220 volt, 50 HZ จะทำการบดฟางข้าวที่ได้มาจากเครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบโดยเครื่องบดชีวมวลละเอียด (รูปที่ 3.1 (ข)) จะทำการบดฟางข้าวให้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.250 – 0.850 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงขนาดอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.4. เตาอบ (oven)

ในรูปที่ 3.1 (ค) แสดงภาพของเตาอบที่ใช้ในการอบฟางข้าว ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบฟางข้าวเพื่อไล่ความชื้นออกจากฟางข้าว เตาอบที่ใช้มีการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส

3.1.1.5. เครื่องคัดขนาดและตะแกรงร่อนขนาด

ในรูปที่ 3.1 (ง) แสดงภาพของเครื่องมือคัดขนาดและตะแกรงร่อนคัดขนาดของฟางข้าวที่ใช้ในการทดลอง โดยขนาดของตะแกรงที่ใช้ในการคัดแยกขนาดอยู่ที่ 0.250, 0.425, 0.600, 0.85 มิลลิเมตร ของ Endecott SHAKER EF.1-1M411, 220/240 Volt, 50 Hz

(ก.) (ข.)

(ค.) (ง.)

รูปที่ 3.1 เครื่องมือในการเตรียมสารตัวอย่าง (ก.) เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ (ข.) เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด (ค.) เตาอบ (ง.) เครื่องคัดขนาดและตะแกรงร่อน

3.1.2 ชุดการทดลองไพโรไลซิสเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ

จากรูปที่ 3.2 จะแสดงแผนภาพของชุดการทดลองของกระบวนการไพโรไลซิส โดยประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

หมายเลข 1 ตัวเก็บสารที่ 1 (Hopper 1) ซึ่งจะเป็นส่วนที่บรรจุสารตัวอย่าง (ฟางข้าว) ในตอนเริ่มต้นการทดลอง

หมายเลข 2 ตัวเก็บสารที่ 2 (Hopper 2) เป็นส่วนที่บรรจุสารตัวอย่างที่ออกมาจากตัวเก็บสารที่ 1 ก่อนที่จะมีการป้อนสารตัวอย่างเข้าสู่เตาเผา โดยในส่วนนี้จะ

มีป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปเพื่อเป็นแก๊สพาเอาไอของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสให้ออกไปสู่ส่วนอื่นๆได้เร็วขึ้น อีกทั้งยังเป็นตัวที่ช่วยในการลดปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบให้มีปริมาณสัดส่วนที่ลดลง

หมายเลข 3 ชุดสกรูที่ 1 (Screw feeder 1) ขนาดยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร จะเป็นส่วนที่ช่วยในการพาสารตัวอย่างจากตัวเก็บสารที่ 1 ให้เข้าสู่ตัวเก็บสารที่ 2

หมายเลข 4 ชุดสกรูที่ 2 (Screw feeder 2) ขนาดยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร จะเป็นส่วนที่ช่วยในการพาสารตัวอย่างจากตัวเก็บสารที่ 2 ให้เข้าสู่ส่วนของการเผาไหม้ หรือเข้าสู่เตาเผา

หมายเลข 5 เตาเผา (Tube furnace) เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นเตาเผาไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำการตั้งอุณหภูมิภายในเตาเผาได้ มีการวัดค่าของอุณภูมิที่ได้จากเตาเผาด้วยเทอร์โมคัปเปิล

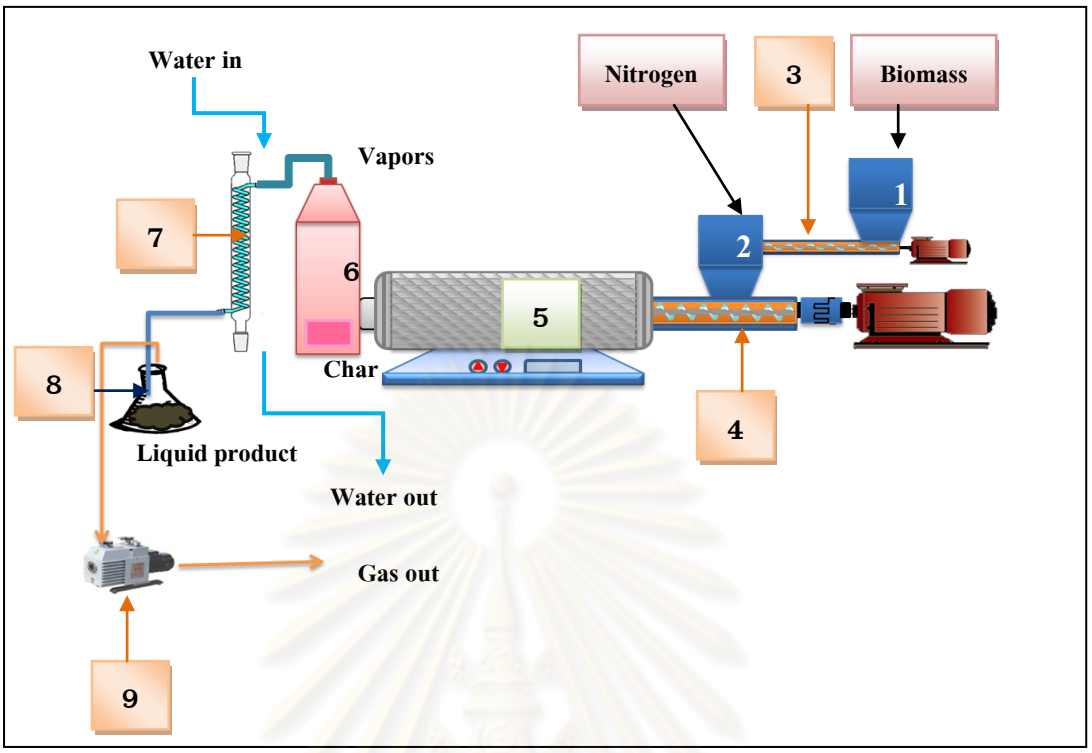
หมายเลข 6 หน่วยแยกสาร (Separator unit) จะเป็นส่วนที่ช่วยในการแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจะตกสู่ด้านล่างของหน่วยแยกสาร ส่วนไอหรือแก๊สที่ได้จากผลิตภัณฑ์จะลอยขึ้นสู่ด้านบนของหน่วยแยกสาร ผ่านไปตามท่อเพื่อเข้าสู่หน่วยควบแน่น

หมายเลข 7 หน่วยควบแน่น (Condenser unit) ทำหน้าที่ในการควบแน่นไอหรือแก๊สของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยอุณหภูมิของหน่วยควบแน่นมีค่าอยู่ที่ 0 องศาเซลเซียส

หมายเลข 8 ภาชนะเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลว (Liquid product containers) จะเป็นส่วนที่เก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ออกมาจากหน่วยควบแน่น

หมายเลข 9 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ทำหน้าที่ช่วยในการดึงเอาไอหรือแก๊สของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ให้ออกมาจากห้องเผาไหม้ได้เร็วขึ้น และเป็นการดึงเอาแก๊สที่ไม่ควบแน่น (Uncondensed gas) ออกจากระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



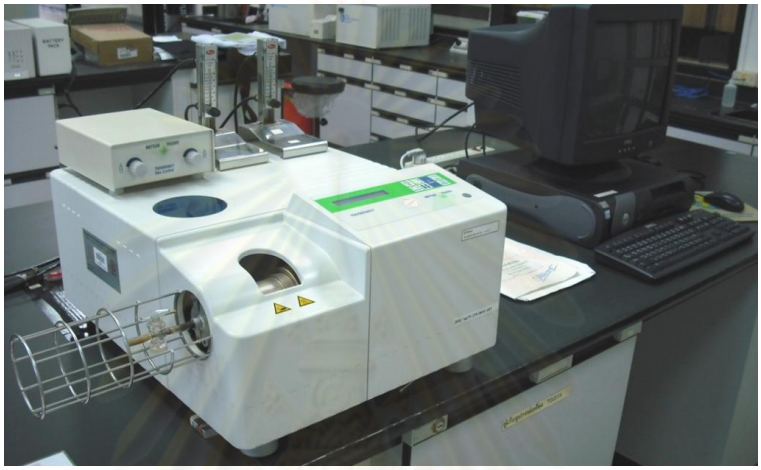
รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง โดยส่วนประกอบที่แสดงในภาพก็จะมีลักษณะที่เหมือนกับแผนภาพ อาทิเช่น ตัวเก็บสารที่ 1 ตัวเก็บสารที่ 2 ชุดสกรูที่ 1 ชุดสกรูที่ 2 เตาเผา และ หน่วยแยกสาร เป็นต้น

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์ค่าการสลายตัวทางความร้อน (Thermo gravimetric/Differential Thermal Analyzer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนหรือพฤติกรรมทางความร้อนของฟางข้าวยี่ห้อ METTLER รุ่น TG/SDTA 851e ดำเนินภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องThermo gravimetric/Differential Thermal Analyzer

3.1.4 เครื่องแก๊สโครมาโทราฟี (Gas Chromatography)

เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีเป็นเครื่องศึกษาองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น GC-2014 แก๊สตัวพา (Carrier gas) เป็น ฮีเลียมม ใช้ Flame Ionization Detector (FID) ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 เครื่อง Gas Chromatography

3.1.5 เครื่องมือหาค่าความหนืด (ASTM D 45)

เป็นเครื่องที่ศึกษาวัดความหนืดของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสของบริษัท แอพพลายด์ ไซแอนทิฟิค อินสตูเม้นท์ส จำกัด รุ่น D445-D20L, Capillary size No. 50 ดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 เครื่องมือวิเคราะห์ความหนืด

3.1.6 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีกับแมสสเปกโทรมิเตอร์ (Gas Chromatograph with Mass Spectrometer), GC-MS

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟกับแมสเปกโทรมิเตอร์ รุ่น CP-3800 ยี่ห้อ VARIAN ใช้คอลัมน์แบบ DB WAX (30x250x0.20 mm) ภายใต้ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส ถึง 230 องศาเซลเซียสที่ความดัน 7.65 psi อัตราการป้อน 1 mL/min เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว แสดงดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟกับแมสเปกโทรมิเตอร์ (Gas Chromatograph with Mass Spectrometer, GC-MS)

3.2 สารตัวอย่างและสารเคมี

3.2.1 ฟางข้าวบดละเอียดมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง น้อยกว่า 0.250 มิลลิเมตร 0.250-0.425 มิลลิเมตร 0.425-0.600 มิลลิเมตร 0.600-0.800 มิลลิเมตร และ มากกว่า 0.800 มิลลิเมตร

3.2.2 แก๊สไนโตรเจน 99.90% จากบริษัท แพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.3 เตตระไฮโดรฟลูราน (Tetra Hydro Furan, THF)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมชีวมวล

3.3.1.1 นำฟางข้าวมาบดด้วยเครื่องบดชีวมวลแบบหยาบและแบบละเอียด

3.3.1.2 นำฟางข้าวที่ผ่านการบด มาทำการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาดให้มีขนาดของฟางข้าวดังนี้ ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.250 มิลลิเมตร 0.250-0.425 มิลลิเมตร 0.425-0.600 มิลลิเมตร 0.600-0.800 มิลลิเมตร และ มากกว่า 0.800 มิลลิเมตร

3.3.1.2 อบฟางข้าวในเตาอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมงโดยให้มีความชื้นน้อยกว่า 5 %

3.3.1.3 นำฟางข้าวไปวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D 3173-3175)

3.3.1.4 วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D 3176-89)

3.3.1.5 วิเคราะห์หาค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177 Method B)

3.3.1.6. วิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำหนักของฟางข้าวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและอุณหภูมิด้วยเครื่อง Thermo gravimetric/Differential Thermal Analyzer (TG/DTA)

3.3.1.7 วิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฟางข้าว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry, (XRF))

3.3.2 ดำเนินการทดลอง

3.3.2.1 ทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10-15 นาที ที่อัตรา 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ

3.3.2.2 เปิดเตาเผาโดยทำการตั้งอุณหภูมิของเตาเผา ตามอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาของกระบวนการไพโรไลซิส ที่ 350 องศาเซลเซียส

3.3.2.3 เมื่ออุณหภูมิของเตาเผามีค่าตามที่ทำการตั้งค่าไว้ นำเอาฟางข้าวปริมาณ 300 กรัม ที่มีขนาดอนุภาค น้อยกว่า 0.250 มิลลิเมตร ป้อนเข้าไปในตัวเก็บสาร (Hopper1) ตามลำดับ

3.3.2.4 ปรับความเร็วสกรูเพื่อทำการป้อนสาร ที่อัตราการป้อนสาร1.76 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (สกรูหมุน 150 รอบต่อนาที)

3.3.2.5 เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ของกระบวนการไพโรไลซิส ผ่านเข้าสู่หน่วยควบแน่น

3.3.2.6 ทำการเก็บผลการทดลองของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

3.3.2.7 คำนวณหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง

3.3.2.8 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.2.2.1-3.2.2.7 โดยมีการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสจาก 350 องศาเซลเซียส เป็น 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับเพื่อทำการศึกษาถึงตัวแปรของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

3.3.2.9 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.2.2.1-3.2.2.7 โดยการเปลี่ยนขนาดอนุภาคที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสจากขนาดอนุภาค น้อยกว่า 0.250 มิลลิเมตร เป็นขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วง 0.250-0.425 มิลลิเมตร 0.425-0.600 มิลลิเมตร 0.600-0.800 มิลลิเมตร และ มากกว่า 0.800 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยอุณหภูมิที่ใช้จะเป็นอุณหภูมิตามข้อ 3.3.2.8 ที่ได้ผลของปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวสุงสุด เพื่อทำการศึกษาถึงตัวแปรของอนุภาคที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

3.3.2.10 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.2.2.1-3.2.2.7 โดยการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารจาก 1.76 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็น 1.90 กิโลกรัมต่อชั่วโมง 2.11กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ2.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้จะเป็นไปตามอุณหภูมิในข้อ 3.3.2.8 และขนาดอนุภาคที่ใช้จะเป็นไปตามข้อ 3.3.2.9 ที่ได้ผลของปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด เพื่อทำการศึกษาถึงตัวแปรอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

3.3.2.11 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.2.2.1-3.2.2.7 โดยการเปลี่ยนอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนจาก 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็น 0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ250 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยอุณหภูมิที่ใช้จะเป็นไปตามอุณหภูมิในข้อ 3.3.2.8 ขนาดอนุภาคที่ใช้จะเป็นไปตามข้อ 3.3.2.9 และอัตราการป้อนสารจะเป็นไปตามข้อ 3.3.2.10 ที่ได้ผลของปริมาณร้อยละผลได้ของ

ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดเพื่อทำการศึกษาถึงตัวแปรอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองของผลิตภัณฑ์

3.4.1 วิเคราะห์สมบัติทางด้านเคมี

3.4.1.1 วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

3.4.1.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

3.4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยน้ำมันชีวภาพ FTIR spectroscopy

3.4.1.4 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทรกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)

3.4.1.5 วิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยแก๊สโครมาโทราฟี (Gas Chromatography)

3.4.1.6 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในน้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี, (NMR)

3.4.2 วิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทั่วไป

3.4.2.1 วิเคราะห์ค่าความหนืด (Viscosity) มาตรฐาน ASTM D 45

3.4.2.2 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point) มาตรฐาน ASTM D 93

3.4.2.3 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย pH meter

3.4.2.4 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (Corrosivity) มาตรฐาน ASTM D1130

3.4.2.5 วิเคราะห์สภาพการละลาย (Solubility)

3.4.2.6 วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในน้ำมัน ASTM D 524-04

3.4.2.7 วิเคราะห์ปริมาณกากคาร์บอน ASTM D 482-95

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของฟางข้าว

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของฟางข้าว

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงผลวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของฟางข้าวที่ใช้ในการทดลอง การวิเคราะห์พบว่าฟางข้าวมีองค์ประกอบของความชื้นมีปริมาณร้อยละ 6.09 เถ้าร้อยละ 15.87 สารระเหยร้อยละ 63.86 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 14.18 จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความชื้นที่มีอยู่ในฟางข้าวเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการระเหยแล้วควบแน่นออกมาเป็นน้ำ ส่วนปริมาณของสารระเหยและคาร์บอนคงตัว เป็นส่วนที่เมื่อได้รับความร้อนจะมีการสลายตัวได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนใหญ่ และปริมาณเถ้าจะเป็นการแส่ดงถึงค่าของถ่านชาร์และขี้เถ้าที่จะเหลือออกมาจากระบวนการ

ในตารางที่ 4.2 แสดงผลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อนของฟางข้าวแห้งพบว่าในฟางข้าวแห้งประกอบไปด้วยองค์ประกอบของคาร์บอนร้อยละ 37.30 ไฮโดรเจนร้อยละ 5.62 ไนโตรเจน 1.10 กำมะถันร้อยละ 0.18 และออกซิเจนร้อยละ 55.80 และค่าความร้อนของฟางข้าวมีค่า 15.82 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณของซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในฟางข้าวเป็นมีค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆและปริมาณซัลเฟอร์ที่พบในฟางข้าวยังสามารถบอกถึงค่าการกัดกร่อนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น (Moisture)	6.09
เถ้า (Ash)	15.87
สารระเหย (Volatiles)	63.86
คาร์บอนคงตัว (Fix carbon)	14.18
รวมทั้งหมด	100

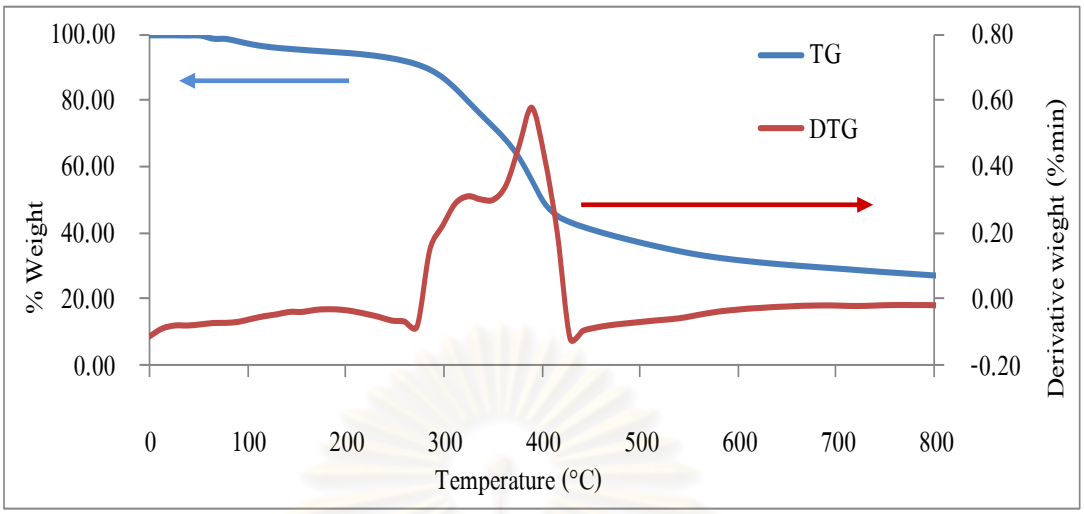
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ*	**ร้อยละโดยน้ำหนัก**
คาร์บอน (C)	37.30
ไฮโดรเจน (H)	5.62
ไนโตรเจน (N)	1.10
กำมะถัน (S)	0.18
ออกซิเจน (O)	55.80
ค่าความร้อน (MJ/kg)	15.82

* พื้นฐานที่รับมา

4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของฟางข้าวด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric analysis, TGA)

การศึกษาค่าการสลายตัวทางความร้อนของฟางข้าว จะทำการศึกษาด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) ภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าฟางข้าวมีค่าการสลายตัวทางความร้อนร้อยละ 60 โดยน้ำหนักอีกร้อยละ 40 เป็นถ่านชาร์และเถ้าที่ยังไม่สลายตัว โดยอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (Initial decomposition temperature, T_{id}) ช่วงแรกที่ 50-200 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงการไล่ความชื้น (Moisture) ที่อยู่ในฟางข้าว ช่วงที่ 2 อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส และ 350 องศาเซลเซียส ช่วงนี้จะเป็นช่วงของการสลายตัวของโฮโลเซลลูโลส (Hollocelluose) และช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ถึง 450 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) เซลลูโลส (Cellulose) โดยลิกนิน (Lignin) บางส่วนจะมีการสลายตัวที่ช่วงนี้ **[47]** ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ เนื่องมาจากปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวไปหมดแล้ว แต่องค์ประกอบของลิกนินยังคงมีอยู่ในปริมาณที่เล็กน้อย ทำให้ยังมีการสลายตัวของลิกนินอยู่บ้าง ลิกนินจะเกิดการสลายตัวได้ดีที่อุณหภูมิสูง โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นแหล่งหลักของการเกิดสารระเหยและน้ำมันชีวภาพ ในขณะที่ลิกนินเกิดการแปรสภาพเป็นถ่านชาร์ จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วงดังกล่าว



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TG) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของฟางข้าว

4.1.3 การวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฟางข้าวด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy)

นำฟางข้าวที่ผ่านการอบให้แห้งแล้วมาวิเคราะห์หาธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบภายในฟางข้าว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุต่างๆดังตารางที่ 4.3 เป็นผลการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฟางข้าวพบว่าในฟางข้าวจะประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ7.43 โพแทสเซียมไดออกไซด์ (K_2O) ร้อยละ 2.35 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 1.21 และไดฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 0.64 พบว่าธาตุส่วนใหญ่จะอยู่ในหมู่อัคคาไลน์ (Alkali) และอัลคาไลน์เฮิร์ธ (Alkali earth) เช่น โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียมและคลอไรด์ **[60]** ซึ่งการที่ฟางข้าวมีองค์ประกอบของธาตุเหล่านี้อยู่อาจเป็นผลมาจากการเพาะปลูกข้าวของเกษตรกร โดยที่องค์ประกอบของธาตุเหล่านี้อาจจะส่งผลต่อการกัดกร่อนของเครื่องมือที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุโลหะต่างๆในฟางข้าวจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (XRF)

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)*
Na_2	0.04
Mg	0.25
Al_2	0.04
Si	7.43
P_2	0.64
S	0.61
Cl	0.08
K_2	2.35
Ca	1.21
C	37.30
H	5.62
N	1.10
S	0.18
O	43.15
รวม	100

* ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, “fundamental parameter calculation”

4.2 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิส

การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าว ประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่

(1) ผลของอุณหภูมิที่ 350 400 450 500 550 600 องศาเซลเซียส

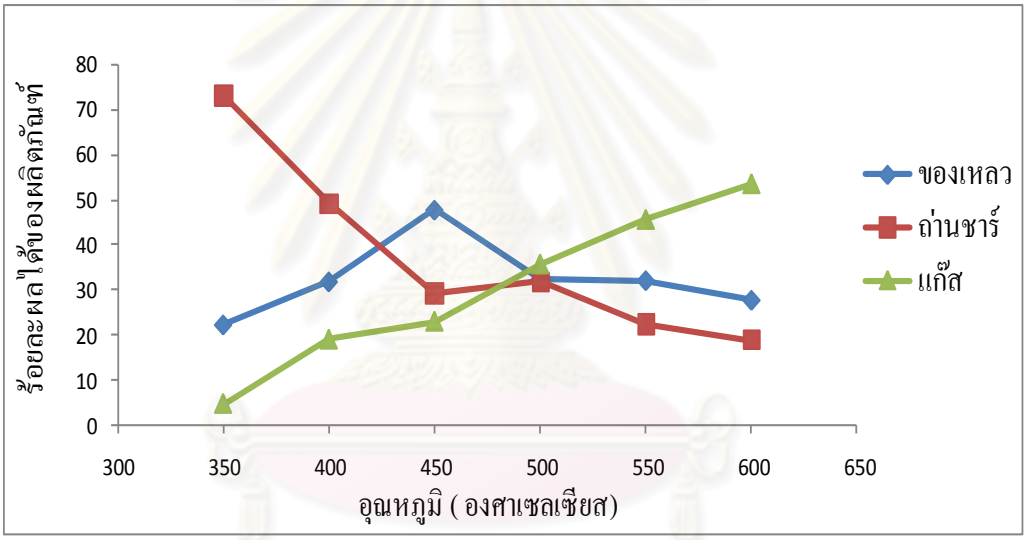
(2) ผลของขนาดอนุภาคมีด้วยกัน 5 ช่วงได้แก่ น้อยกว่า 0.250 มิลลิเมตร 0.250-0.425 มิลลิเมตร 0.425-0.600 มิลลิเมตร 0.600-0.850nมิลลิเมตร และ มากกว่า 0.850 มิลลิเมตร

(3) ผลอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ที่ 0 50 100 200 และ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

(4) ผลอัตราการป้อนสารที่ 1.76 1.90 2.11และ2.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้ทำศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 350 – 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคที่ใช้อยู่ในช่วง 0.250 – 0.600 มิลลิเมตร โดยไม่มีการป้อนแก๊สไนโตรเจนและอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 1.67 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในการทดลองจะใช้ปริมาณฟางข้าวที่ 300 กรัม โดยพบว่าผลที่ได้จากการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อปริมาณรวมของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าช่วงอุณหภูมิ 350 ถึง 400 องศาเซลเซียส ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ แต่ในส่วนของปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สมีแน้วโน้มที่ลดลง ซึ่งเป็นผลของความร้อนที่ให้แก่ระบบยังไม่เพียงพอต่อการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ (De-polymerization) ที่อยู่ในรูปของสารระเหยในฟางข้าว ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ปริมาณของถ่านชาร์จึงคงเหลือมาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 450 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูง เป็นร้อยละ 47.90 และผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ลดลงเหลือร้อยละ 29.18 เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแตกตัว

ของ สารระเหย (Thermal cracking) เกิดขึ้นได้ดี ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้า ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยา 4.1 และ 4.2

$$\text{Thermal cracking: } pC_nH_x \rightarrow qC_mH_y + rH_2 \qquad 4.1$$

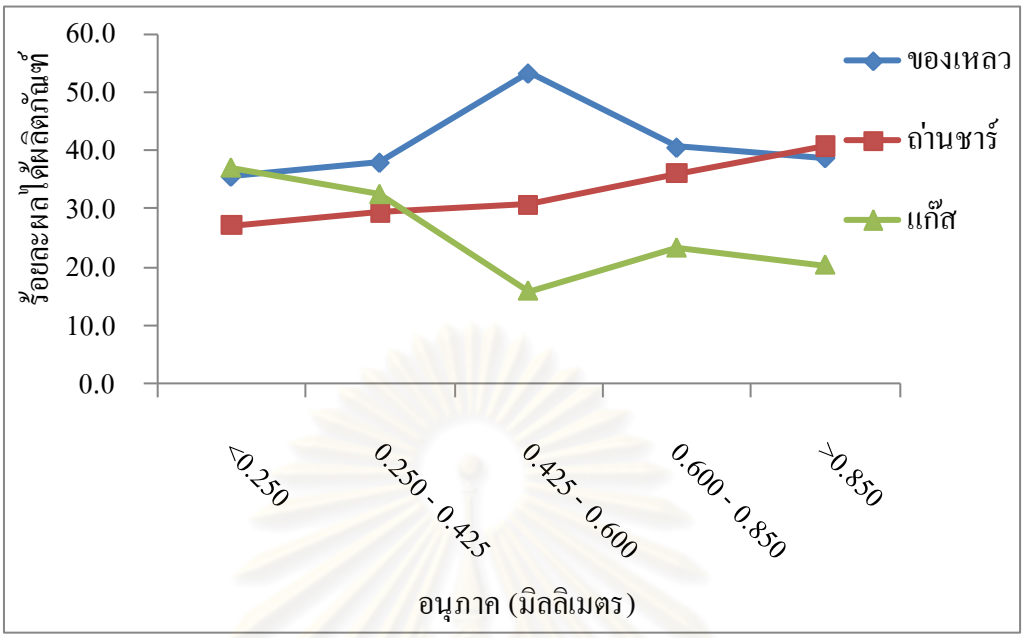
$$\text{Carbon formation: } C_nH_x \rightarrow nC + x/2H_2 \qquad 4.2$$

จากสมการปฏิกิริยาข้างต้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 450 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านชาร์มีค่าลดลง ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะส่งต่อต่อการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) **[61]** อย่างต่อเนื่องทันทีทำให้ปริมาณของถ่านชาร์มีการสลายตัวต่อไปได้แก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้ (Uncondensable gas) เป็นผลทำให้มีสารระเหยที่เกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าลดลง

จากการศึกษาภาวะของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูงสุดเท่ากับ 47.90 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกใช้อุณหภูมิในช่วงนี้ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

ในการศึกษาหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส จะทำการศึกษาขนาดอนุภาคในช่วงขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.250, 0.250 – 0.425, 0.425 – 0.600, 0.600 – 0.850 และ มากกว่า 0.850 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส โดยไม่ได้มีการป้อนแก๊สไนโตรเจนและอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 1.76 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยผลจากการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.3 เป็นผลการศึกษาภาวะของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด โดยพบว่าที่ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 250 มิลลิเมตร ได้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ 35.67 ปริมาณถ่านชาร์ร้อยละ 27.24 และแก๊สร้อยละ 37.09 ขนาดอนุภาคในช่วง 0.250 – 0.425 มิลลิเมตร ได้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ 38.05 ถ่านชาร์ร้อยละ 29.44 และแก๊สร้อยละ 32.51 โดยจะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคจากขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.250 มิลลิเมตรเป็น ช่วงอนุภาค 0.250 – 0.425 มิลลิเมตร สัดส่วนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคที่เล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) กับความร้อนที่มากกว่าฟางข้าวที่มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ เป็นผลทำให้การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) ระหว่างพื้นผิวอนุภาคเกิดขึ้นได้ดี เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) ได้ดี ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊สในปริมาณที่สูง ดังสมการที่ 4.3 -4.4

ชีวมวล + ความร้อน ⟶ ถ่านชาร์ + แก๊ส + น้ำมันชีวภาพ 4.3

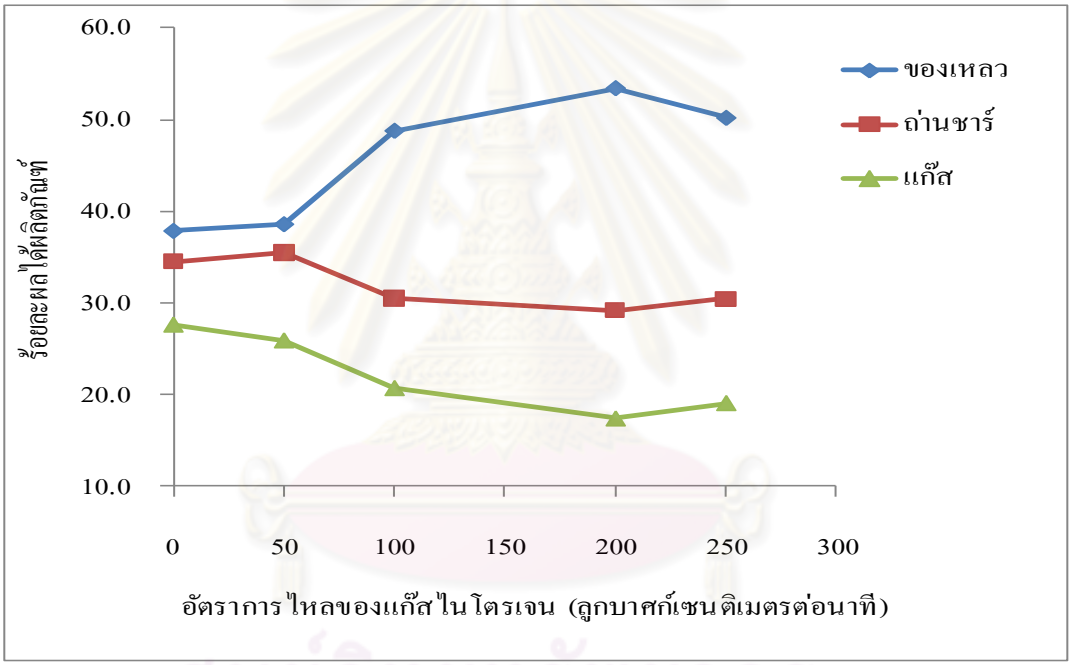
ถ่านชาร์ + แก๊ส + น้ำมันชีวภาพ+ ความร้อน (สูง) ⟶ แก๊ส 4.4

ขณะเดียวกันอนุภาคที่ใหญ่กว่า 0.850 มิลลิเมตร จะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดน้อยลง ปริมาณสัดส่วนถ่านชาร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่มีผลให้พื้นผิวน้อย การถ่ายโอนความร้อนระหว่างอนุภาคจึงเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้การสลายตัวไม่สมบูรณ์ทำให้ได้

ปริมาณถ่านชาร์ที่สูง จากการทดลองพบว่าที่ช่วงขนาดอนุภาค 0.425 – 0.600 มิลลิเมตร เป็นช่วงของขนาดอนุภาคที่ให้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดที่ 53.34 ดังจึงสรุปว่าช่วงขนาดอนุภาค 0.425 – 0.600 มิลลิเมตร เป็นช่วงขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้

4.2.3 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

ในการศึกษาภาวะของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ จะดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.425 – 0.600 มิลลิเมตรและอัตราการป้อนสารที่ 1.76 กิโลกรัมต่อชั่วโมงแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.4 พบว่ามีการป้อนอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อัตรา 0 50 100 200 และ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เมื่อไม่มีการป้อนแก๊สไนโตรเจน ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่า 37.91 ปริมาณถ่านชาร์ 34.53 และแก๊ส 27.56 และเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ให้ผลการทดลองตรงข้ามกับสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สซึ่งมีแนวโน้มที่ลดต่ำลงเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ส่วนปริมาณถ่านชาร์มีค่าร้อยละผลได้ที่ค่อนข้างคงที่ประมาณร้อยละ 30 - 35 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ส่งผลต่อการขจัดสารระเหยหรือเป็นตัวพาสารระเหยในระบบให้ออกสู่ภายนอก อัตราการไหลของแก๊ส

ไนโตรเจนที่สูงเกินไป เป็นการทำให้การกำจัดแก๊สที่ควบแน่นได้ (Condense gases) ต่างๆออกจากระบบได้เร็วขึ้น ทำให้ไอระเหยนั้นมีการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ จึงได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีปริมาณที่ลดน้อยลง ขณะเดียวกันที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่ำจะขจัดสารระเหยแก๊สออกจากระบบได้ช้าเป็นผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิได้อีก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊สมากขึ้น

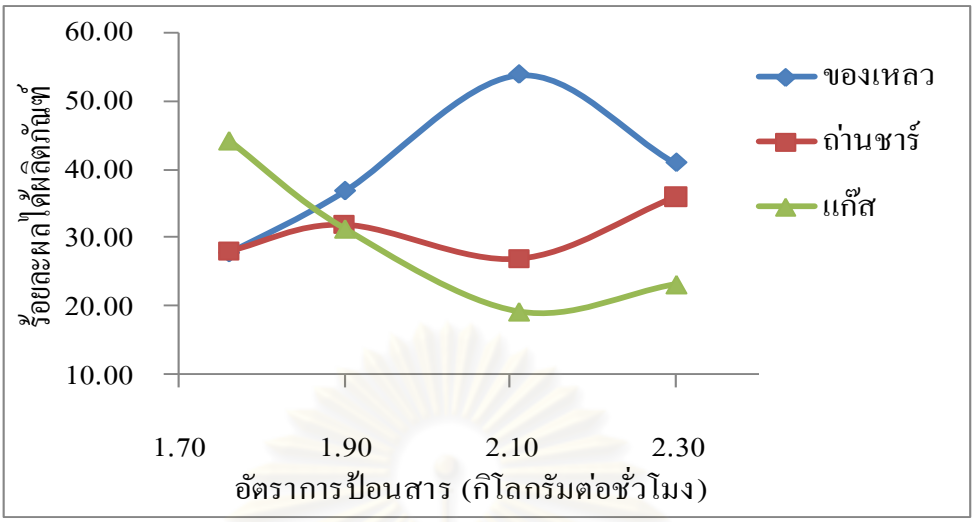
การทดลองพบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะเป็นผลทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูงสุดที่ 53.441 ทำให้สรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้

4.2.4 ผลของอัตราการป้อนสาร

การศึกษาอัตราการป้อนสารที่เหมาะสมต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ โดยทำการปรับเทียบความสัมพันธ์ของความเร็วของสกรูกับอัตราการป้อนสารดังตารางที่ 4.4 ในการศึกษาภาวะของอัตราการป้อนสารนี้ จะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเหมาะสม 0.425 – 0.600 มิลลิเมตร และที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เมื่อทำการปรับเทียบความเร็วของสกรูที่ค่า 150 200 250 และ 300 รอบต่อนาที จะได้ค่าของอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 1.76 1.90 2.11 และ 2.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ และมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Residence time) กับความร้อน ที่ 2.05 1.90 1.71 และ 1.57 วินาที ตามลำดับ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาของงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 1-2 วินาที ซึ่งเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ตารางที่ 4.4 ผลการปรับเทียบความสัมพันธ์ของความเร็วของสกรูกับอัตราการป้อนสาร

ความสกรู (รอบ/นาที)	อัตราการป้อนสาร (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (วินาที)
150	1.76	2.05
175	1.90	1.90
200	2.11	1.71
225	2.30	1.57



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการป้อนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.5 แสดงผลของอัตราการป้อนสารที่มีต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่อัตราการป้อน 1.76 1.90 2.11 และ 2.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงที่อัตราการป้อนสาร 2.11 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและหลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง ในส่วนของถ่านชาร์และแก๊สมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ โดยพบว่าที่อัตราการป้อนสารต่ำ (สกรูหมุนช้า) ฟางข้าวที่เข้ามาในกระบอกเตาปฏิกรณ์จะมีปริมาณน้อย (มีปริมาตรไม่เต็มกระบอกของเตาปฏิกรณ์) และความร้อนที่ทำให้เกิดการสลายตัวของฟางข้าวปริมาณที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา เป็นผลทำแนวโน้มของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูง (ซึ่งในช่วงนี้ที่อัตราการป้อนสารสูงจะทำให้ได้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีค่าสูงขึ้นด้วย) โดยพบว่าที่อัตราการป้อนสารต่ำ เวลาในการทำปฏิกิริยา (Residence time) ไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ แต่เมื่อทำการเพิ่มอัตราการป้อนที่สูงขึ้นเรื่อยๆ (สกรูหมุนเร็ว) เป็นผลให้สารตัวอย่าง การป้อนเข้าสู่กระบอกของเตาปฏิกรณ์ได้มากขึ้น จนเต็มปริมาตรของเตาปฏิกรณ์ ในขณะที่ให้ความร้อนที่ให้แก่ระบบมีปริมาณคงที่ การกระจายของความร้อนเข้าสู่เนื้อชีวมวลจึงไม่ทั่วถึงเหมือนในช่วงอัตราการป้อนต่ำและที่อัตราการป้อนสารสูงเวลาในการทำปฏิกิริยา (Residence time) ของสารตัวอย่างกับความร้อนจะมีค่าที่น้อยลง เป็นผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าที่ลดลง เนื่องจากฟางข้าวที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์และผ่านออกจากเตาปฏิกรณ์มีอัตราที่เร็วมาก จนทำให้ฟางข้าวเกิดการสลายตัวทางความร้อนไม่หมด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นถ่านชาร์สูง ดังนั้นที่อัตราการป้อนสารที่สูงความร้อนจะไม่ค่อยมีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ แต่จะขึ้นอยู่กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของฟางข้าวกับความร้อน (Residence time)

จากการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนสารที่อัตราการป้อนสาร 2.11 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็นอัตราที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดที่ร้อยละ 53.83 จึงเลือกใช้อัตราการป้อนสารที่อัตราการป้อนสารนี้

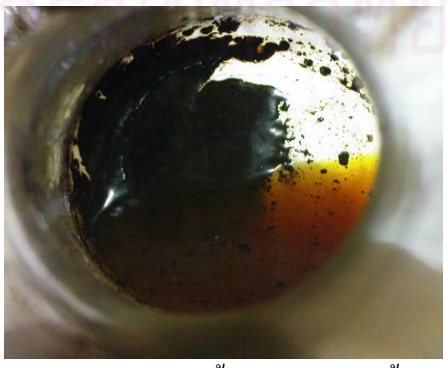
4.3 ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์เหลว

ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเหมาะสม 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.425 – 0.600 มิลลิเมตร อัตราการป้อนสารที่ 2.11 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.5 ร้อยละอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ประกอบด้วยน้ำมันเบา น้ำมันหนัก และน้ำ

ครั้งที่	**ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว**		
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก	น้ำ
1	31.52	18.57	49.91
2	32.91	19.16	47.93
3	34.67	17.24	48.09
เฉลี่ย	33.03	18.33	48.64

ตารางที่ 4.5 พบว่าน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสจะสามารถที่แบ่งได้ 2 ส่วนหลักคือ ส่วนของน้ำมันเบาและส่วนของน้ำมันหนักและเกิดการแยกเฟสระหว่างน้ำมันทั้งสองโดยน้ำมันเบา (เฟสบน) แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 โดยมีสัดส่วนของน้ำมันเบาร้อยละ 33.03 และน้ำมันหนัก (เฟสล่าง) ร้อยละ18.32 หรืออัตราส่วนน้ำมันหนักต่อน้ำมันเบา 1 ต่อ 1.8



รูปที่ 4.6 การแยกเฟสของน้ำมันหนักและน้ำมันเบา **[62]**

(ก.) น้ำมันเบา (ข.) น้ำมันหนัก

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างของน้ำมันชีวภาพที่จากกระบวนการไพโรไลซิส **[62]**

4.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

4.4.1 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ

การหาค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะสามารถวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่องมือบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ในน้ำมันชีวภาพจะมีองค์ประกอบของน้ำอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อนจากน้ำมันชีวภาพ น้ำมันชีวภาพนั้นต้องผ่านการกลั่นแยกน้ำออกที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยจากการทดลองพบว่าค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 23 - 29 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ช่วงการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	**ค่าความร้อน** (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)
350	29.20
400	29.18
450	28.20
500	25.86
550	23.52
600	23.68

4.4.2 ค่าความร้อนของถ่านชาร์

การหาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าว พบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการทดลองที่ภาวะของอุณหภูมิระหว่าง 350 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความร้อนของถ่านชาร์จากการทดลองมีค่าประมาณ 15 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม พบว่าค่าความร้อนที่ได้มีค่าน้อยกว่าในน้ำมันชีวภาพ และมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าความร้อนของฟางข้าว

พบว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ค่าความร้อนของถ่านชาร์มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลมาจากที่อุณหภูมิสูงความชื้นที่อยู่ในชีวมวลจะถูกขับออกไปจากเนื้อชีวมวลได้มาก โดยโมเลกุลของน้ำที่ยึดติดหรือดูดซับบนพื้นผิวของโครงสร้างเซลล์ชีวมวลจะถูกปล่อยออกมา ทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความชื้นที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงสารระเหยที่อยู่ในชีวมวลก็เกิดการสลายตัวทางความร้อนหรือถูกปลอปล่อยออกไปได้มาก ซึ่งถ่านชาร์ที่ได้จะมีสัดส่วนของสารระเหยต่ำ แต่มีปริมาณของคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ โดยค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความชื้นถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลต่อความความร้อนของชาร์ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.7 ค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	**ค่าความร้อน** (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)
350	14.66
400	14.38
450	15.26
500	15.47
550	15.42
600	15.21

4.4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์ CHNS พบว่าในน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจน โดยองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพจะมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 62.015 และในถ่านชาร์มีองค์ประกอบของออกซิเจนมากที่สุดที่

ร้อยละ 69.760 ผลการทดลองแสดงในตาราง 4.8 โดยปริมาณขององค์ประกอบที่ได้นั้นเป็นผลมาจากองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ ซึ่งเกิดจากการที่ชีวมวลเมื่อได้รับความร้อนแล้วเกิดการสลายตัวทางด้านเคมีของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ในส่วนของถ่านชาร์ที่มีปริมาณของคาร์บอนที่น้อยอาจเป็นผลมาจากองค์ประกอบคาร์บอนในชีวมวลได้สลายตัวกลายเป็นน้ำมันชีวภาพและแก๊ส ทำให้มีองค์ประกอบคาร์บอนบางส่วนหลงเหลืออยู่ในถ่านชาร์

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

องค์ประกอบ	**ร้อยละโดยน้ำหนัก**	
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์
คาร์บอน	62.02	28.55
ไฮโดรเจน	8.66	1.61
ไนโตรเจน	0.33	0.05
กำมะถัน	0.40	0.03
ออกซิเจน*	28.59	69.76
รวม	100	100

* คำนวณโดยใช้ผลต่าง (by difference)

4.4.4 สมบัติพื้นฐานต่างๆของน้ำมันชีวภาพ

การทดสอบสมบัติพื้นฐานต่างๆของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้การทำงานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.425 – 0.600 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ อัตราการป้อนสาร 2.11 กิโลกรัมต่อนาที (เป็นภาวะที่ได้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวสูงที่สุด) โดยจะมีการทดสอบและวิเคราะห์ค่าสมบัติต่างๆ เช่น ค่าความร้อน ความหนาแน่น ค่าความหนืด ความเป็นกรด-ด่าง จุดวาบไฟ เป็นต้น โดยจะพบว่าค่าจากการทดสอบสมบัติต่างๆของน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวจะมีค่าความร้อนอยู่ที่ 28.198 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าความหนาแน่นที่ 1105.206 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความหนืดเท่ากับ 0.812 เซนติสโตก ร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนที่เหลือมีค่า 3.52 ร้อยละโดยน้ำหนักขี้เถ้ามีค่า 16.76 ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 3.34 และจุดวาบไฟที่ 72 องศาเซลเซียส ดังที่แสดงในตารางที่ 4.9 อีกทั้งในตารางนี้ยังแสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพจากฟาง

ข้าวโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส เปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพจากผักตบชวาที่ใช้กระบวนการไพโรไลซิสและน้ำมัน Narabia ที่เป็นน้ำมันดิบจากบริษัท ปตท จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าว

สมบัติ	น้ำมันชีวภาพ			วิธีการวิเคราะห์
	ฟางข้าว	ผักตบชวา[1]	Narabia[*,1]	
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)**	28.20	31.00	44.50	ASTM D3177
ความหนาแน่น 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1105	1060	880	ASTM D1298
ค่าความหนืด 40 องศาเซลเซียส (cSt)	0.81	0.73	n/a	ASTM D445
คาร์บอนที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	3.52	4.53	-	ASTM D524-04
ขี้เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	16.76	11.69	0.04	ASTM D 482-03
ค่าความเป็นกรดเบส	3.34	3-4	5.20	pH meter
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)[**]	72	76	35	ASTM D 92

[*] หมายเหตุ Narabia เป็นน้ำมันดิบจากบริษัท ปตท จำกัด (มหาชน)

[**] ค่าความร้อนและจุดวาบไฟเป็นค่าที่หาได้เมื่อน้ำมันผ่านการกลั่นแยกเอาน้ำออกแล้ว

[1] **[62]**

4.4.4.1 ค่าความหนืด (Viscosity)

ในการวัดค่าความหนืด (Viscosity) ของน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากผักตบชวาเมื่อทำการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นของ Narabia จะมีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวและผักตบชวามีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นความหนืดที่ได้ลดลง เนื่องมาจากความร้อนมีผลทำให้โครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัว **[63]**

4.4.4.2 คาร์บอนที่เหลือ (Carbon residue)

ในส่วนของกากคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้พบว่า Narabia ไม่มีส่วนของคาร์บอนที่เหลืออยู่เลยเนื่องมาจากคาร์บอนถูกใช้ในกระบวนเผาไหม้หมด และปริมาณของขี้เถ้ามีค่าน้อยมากเพียงแค่ 0.04 เมื่อเทียบกับน้ำมันชีวภาพทั้งสองชนิด และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวและผักตบชวาพบว่า ปริมาณของคาร์บอนที่เหลือมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อ

เปรียบเทียบค่าของปริมาณขี้เถ้าพบว่า ฟางข้าวจะมีปริมาณของขี้เถ้าที่สูงกว่าของผักตบชวา เนื่องมาจากฟางข้าวเป็นชีวมวลที่มีปริมาณของกากเถ้าที่สูงเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่นที่จะมีปริมาณขี้เถ้าอยู่แค่เพียงที่ร้อยละ 1-3 ทั้งนี้จะเห็นว่าปริมาณกากคาร์บอนที่หลงเหลือหลังจากการเผาไหม้และขี้เถ้ายังอยู่ในปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่กระทรวงพาณิชย์กำหนดไว้ โดยกากคาร์บอนที่เหลือต้องมีปริมาณร้อยละ 0.05 และขี้เถ้าร้อยละ 0.01**[64]**

4.4.4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมันชีวภาพทั้งสองมีค่าประมาณ 3 ซึ่งเป็นภาวะที่เป็นกรดอ่อน แต่ก็ยังมีความเป็นกรดที่มากกว่าในส่วนของน้ำมันดิบ Narabia เนื่องมาจากน้ำมันชีวภาพจะประกอบไปด้วยสารประกอบที่เป็นกรดมากกว่าร้อยละ 7-12 (ฟีนอล เมทานอล แอลกอฮออล์ ฮัลดีไอด์ คีโตน)

4.4.4.4 จุดวาบไฟ (Flash point)

จุดวาบไฟ (Flash point) ในงานวิจัยนี้พบว่ามีค่าอยู่ที่ 72 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจุดวาบไฟของน้ำมันชีวภาพจะอยู่ที่ 40-70 องศาเซลเซียส แต่ในงานวิจัยนี้ค่าที่ได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าตามทฤษฎี ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการแยกน้ำออกจากน้ำมันชีวภาพได้ไม่หมดและเป็นผลมาจากองค์ประกอบของกรดที่ที่มีอยู่ในน้ำมัน ทำให้อุณหภูมิของจุดวาบไฟมีค่าที่สูงกว่าตามทฤษฎี เมื่อนำเอาน้ำมันชีวภาพไปหาจุดวาบไฟน้ำมันจะเกิดการระเหย แต่ถ้ามีน้ำอยู่ในระบบความดันไอของน้ำจะไปยับยั้งไอสารระเหยในน้ำมันทำให้ค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไป **[65]**

4.4.4.5 การกัดกร่อน (Corrosion)

การหาค่าการกัดกร่อน (Corrosion) เป็นการนำน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสของฟางข้าวที่ได้จากทดลองมาทำการวัดค่าการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM D130/IP 154 โดยใช้วัสดุแผ่นทองแดงจุ่มลงไปในน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำมาเทียบกับแถบสีมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าแผ่นทองแดงที่มีผ่านการจุ่มลงในน้ำมันชีวภาพ มีสีที่ตรงกับแถบสีมาตรฐานที่ 1b เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า ที่ตำแหน่ง 1b เป็นช่วงค่าการกัดกร่อนที่เล็กน้อย (Slight tarnish) หรือสังเกตได้อีกว่าน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ดังในข้อมูลข้างต้น พบว่ามีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซัลเฟอร์ในปริมาณที่ต่ำอยู่ที่ 0.398 ซึ่งปริมาณซัลเฟอร์เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการกัดกร่อน โดยปกติน้ำมันดีเซลและน้ำมันเบนซินที่มีการใช้งานปัจจุบันจะต้องมีค่าการกัดกร่อนไม่เกินร้อยละ 1 พบว่าค่าการกัดกร่อนแผ่น

ทองแดงของน้ำมันดีเซลและเบนซินอยู่ในช่วง 1a ซึ่งเป็นช่วงการกัดกร่อนค่อนข้างน้อยมาก**[67-68]** เพราะน้ำการที่น้ำมันดีเซลและน้ำมันเบนซินต้องมีค่าการกัดกร่อนที่ต่ำเนื่องจาก เป็นการลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่มีการใช้น้ำมันชนิดดังกล่าว

รูปที่ 4.8 ค่ากัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าว ตามมาตรฐาน ASTM D130/IP 154

4.5 การทดสอบองค์ประกอบทางด้านเคมี

4.5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณร้อยละขององค์ประกอบของแก๊สที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆในกระบวนการไพโรไลซิส โดยจากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 39.57 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 41.91 แก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 16.69 แก๊สมีเทนร้อยละ 1.83 และพบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อทำการพิจารณา รูปที่ 4.9 จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับมีแนวโน้มของปริมาณร้อยละที่ลดลง ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการที่การที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน อุณหภูมิในช่วงที่เกิดรีดักชันมีค่าระหว่าง 500-900 องศาเซลเซียส ในโซนนี้แก๊สบางส่วนจากการเผาไหม้จะไหลเข้าไปทำปฏิกิริยากับถ่านร้อนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ทำให้เกิดปฏิกิริยาแปลงสภาพของแข็งเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนได้ โดยในปฏิกิริยาที่ 4.5 และ 4.6 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง แก๊สที่ได้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน โดยปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีวมวลจะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะเกิดปฏิกิริยาได้มากน้อยเพียงใด

ปฏิกิริยาบูดูอาร์ด (Boudouard reaction) **[8]**

$$C + C_2O \leftrightarrow 2CO_2 \qquad 4.5$$

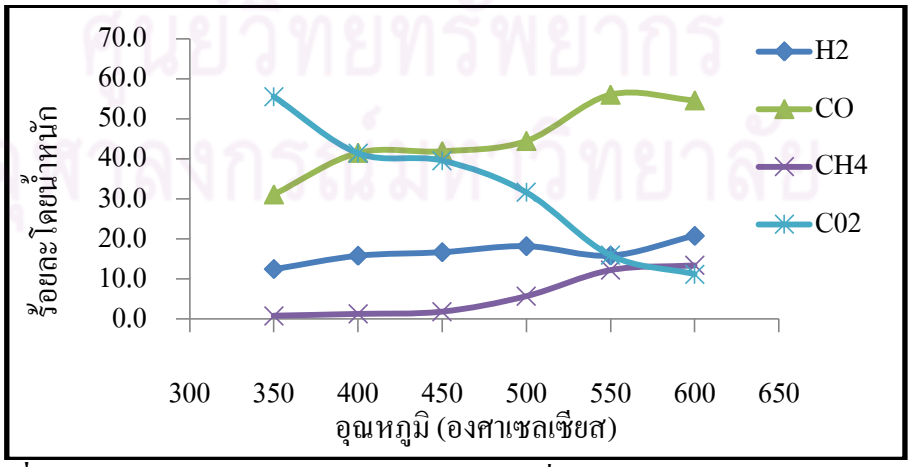
ปฏิกิริยาน้ำแปลงแก๊ส (Water gas reaction) **[8]**

$$C + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \qquad 4.6$$

โดยที่อุณหภูมิสูงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีการรวมตัวกับแก๊สไฮโดรเจนเกิดเป็นแก๊สคาร์มอนอกไซด์เป็นผลทำให้ที่อุณหภูมิสูงปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีสัดส่วนที่ลดลงเนื่องจากมีการถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.10 ปริมาณร้อยละขององค์ประกอบของแก๊สที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆในกระบวนการไพโรไลซิส

แก๊ส	อุณหภูมิ					
	350	**400**	**450**	**500**	**550**	**600**
H_2	12.46	15.80	16.69	18.19	15.84	20.78
CO	31.14	41.52	41.90	44.47	56.02	54.59
CH_4	0.82	1.26	1.84	5.70	12.24	13.42
CO_2	55.58	41.42	39.57	31.64	15.90	11.21
total	100	100	100	100	100	100



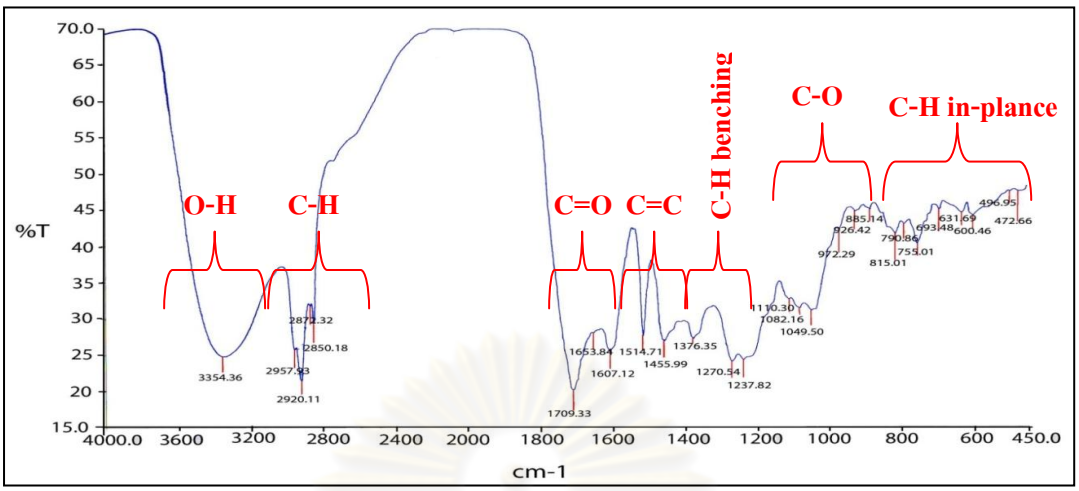
รูปที่4.9 ปริมาณร้อยละขององค์ประกอบของแก๊สที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆในกระบวนการไพโรไลซิส

4.5.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสของฟางข้าว ดังรูปที่ 4.10 พบว่าน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของทั้งสารประกอบของหมู่ออกซิเจน (Oxygen containing compounds) และกลุ่มไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon compounds)โดยสารประกอบของหมู่ออกซิเจน (Oxygen containing compounds) ได้แก่ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน เอสเทอร์ เห็นได้จากพีคของ O–H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wave number) 3200 – 3600 cm^{-1} เป็นสารประกอบกลุ่มพอลิเมอร์ และแอลกอฮอลล์ พีคของ C=O ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1750 –1680 cm^{-1} เป็นสารประกอบกลุ่ม คีโตน อัลดีไฮด์ พีคของ C-H in-plane ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 900–690 cm^{-1} เป็นสารประกอบกลุ่มอะโรมาติก สำหรับกลุ่มไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon compounds) ซึ่งได้แก่ อะโรมาติก แอลเคน แอลคีน ซึ่งเห็นได้จากอินฟาเรดสเปกตรัมของพีค C-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2800 – 3000 cm^{-1} ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มแอลเคน พีคของ C=C ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1645–1500 cm^{-1} เป็นสารประกอบแอลคีนและอะโรมาติก และพีคของการเปลี่ยนรูป (Deformation) C-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1450 –1350 cm^{-1} จะเป็นสารประกอบแอลเคน **[68]** ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพของฟางข้าวจากกระบวนไพโรไลซิส

หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงเลขคลื่น ($ซม^{-1}$)	ชนิดของสารประกอบ
O-H stretching, N-H stretching	3200 – 3600	Polymeric O-H, water -NH
C-H stretching	2800 – 3000	Alkanes
C=O stretching	1750 – 1680	Ketones, aldehyde groups
C=C stretching	1645 – 1500	Alkenes, aromatics
$-NH_2$ stretching, N-H benching	1500 - 1450	Nitrogenous compounds
C-H benching	1450 – 1350	Alkanes
C-O stretching, O-H benching	1300 - 950	Alcohols, ethers
C-H in-plane benching	900 – 690	Aromatic compounds



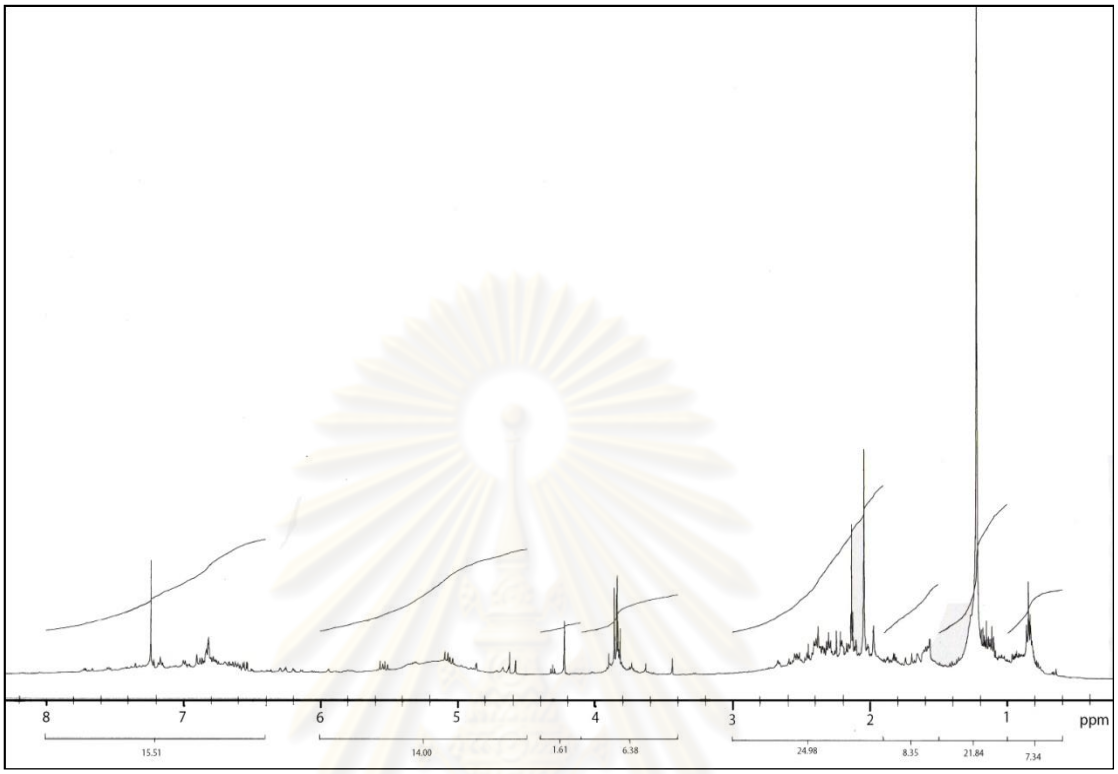
รูปที่ 4.10 องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพของฟางข้าวจากกระบวนไพโรไลซิส

4.5.3 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (^{1}H-NMR)

ตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (^{1}H-NMR) **[69]** พบว่าในน้ำมันชีวภาพประกอบไปด้วยกลุ่มของอะโรมาติก ที่ตำแหน่ง 6.19-7.73 ppm มีปริมาณร้อยละ 22.16 อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับออกซิเจนที่ตำแหน่ง 3.34-5.57 ppm มีปริมาณร้อยละ19.94 อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับกลุ่มอะโรมาติกและแอลคีนที่ตำแหน่ง 1.98-2.67 พีพีเอ็ม มีปริมาณร้อยละ19.52 และอะลิฟาติกที่ทำพันธะกับสารอื่นๆ ที่ตำแหน่ง 0.81-1.87 ppm มีปริมาณร้อยละ38.38 สามารถสรุปได้ว่าใน น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของอะโรมาติกและไฮโดรคาร์บอน

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (^{1}H-NMR)

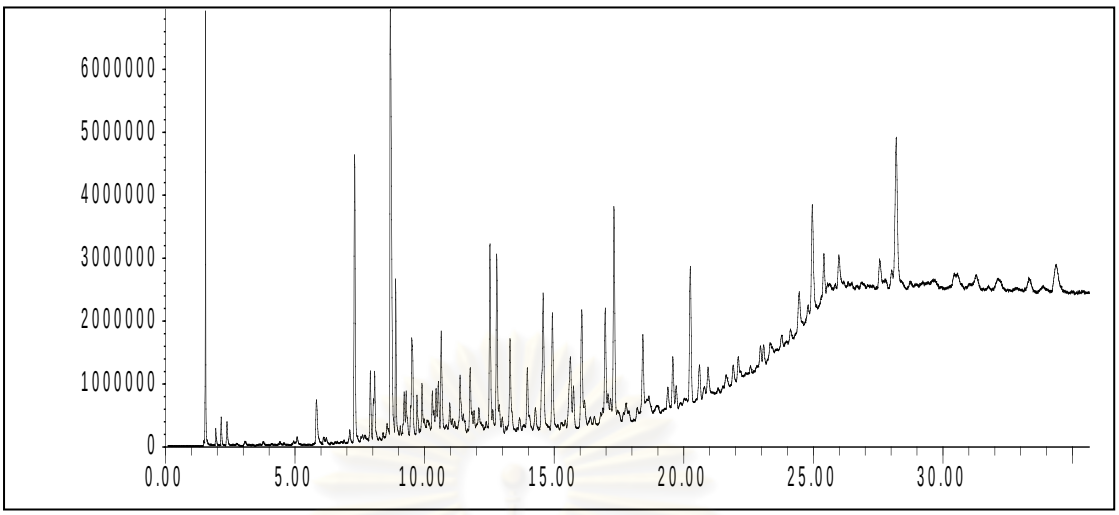
Type of hydrogen	Chemical shift (ppm)	Bio-oil mol % (% of total hydrogen)
Aromatic	6.19-7.73	22.16
Aliphatic adjacent to oxygen	3.34-5.57	19.94
Aliphatic adjacent to aromatic/alkene group	1.98-2.67	19.52
Other aliphatic	0.81-1.87	38.38



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (^{1}H-NMR)

4.5.4 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ- แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography - Mass Spectrometry)

การวิเคราะห์ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าว วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปี (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy) ในรูปที่ 4.12 พบว่าในน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ เช่น Acetic acid, 1, 2-Benzenediol, Hexane, Hydroxyacetone, Propanoic acid, o-Methoxyphenol, 2-methoxyphenethyl alcohol และ Phenol เป็นต้น โดยสารที่พบในน้ำมันชีวภาพจะเป็นสารประกอบคีโตนและแอลกอฮอลล์ เป็นส่วนใหญ่ ในน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองนี้จะมีปริมาณของกรดต่างๆ เช่น Acetic acid, Formic acid, Propanoic acid และ Butanoic acid พบว่ามีปริมาณรวมกันเกือบร้อยละ 20 โดยพื้นที่ส่งผลทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความเป็นกรด ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพที่มีค่า pH อยู่ที่ 3.34 นอกจากนี้ยังพบสารประกอบฟีนอลด้วย แสดงดังตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.12 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวจากแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโครปี

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสฟางข้าวโดย GC-MS

Rt(min)	Compound	Pct Max	%Area
1.54	Hexane	27.16	4.06
1.93	Acetone	12.23	1.83
2.37	Ethoxyethanol	5.67	0.85
5.82	Limonene	11.19	1.67
7.3	Hydroxyacetone	50.12	7.50
7.91	2-cyclopenten-1-one	10.57	1.58
8.07	1-hydroxy-2-butanone	15.72	2.35
8.68	Acetic acid	100	14.96
8.88	Acetoxyacetone	22.11	3.31
9.21	Formic acid	8.24	1.23
9.29	2-Acetylfuran	8.94	1.34
9.51	Propanoic acid	26.04	3.90
9.7	2,3-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one	7.49	1.12
9.9	2-methyl-5-formylfuran	8.98	1.34
10.3	Butanoic acid	7.18	1.07
10.44	Glycol	8.36	1.25
10.53	Butyrolactone	10.22	1.53

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสฟางข้าวโดย GC-MS (ต่อ)

Rt(min)	Compound	Pct Max	%Area
11.76	Isocrotonolactone	7.03	1.05
12.78	o-Methoxyphenol	31.41	4.70
13.96	p-Creosol	18.08	2.70
14.57	Phenol	39.73	5.94
14.93	2-methoxyphenethyl alcohol	25.19	3.77
15.62	p-Cresol	23.05	3.45
15.74	m-Cresol	8.94	1.34
16.06	cyclobutanol	21.6	3.23
16.77	p-Ethylphenol	24.16	3.61
17.31	p-Vinylguaiacol	44.41	6.64
18.42	Syringol	15.07	2.25
19.58	Isoeugenol	10.17	1.52
20.93	3-pyridinol	7.61	1.14
24.96	1,2-Benzenediol	33.41	5.00
25.41	Methoxyeugenol	9.16	1.37
25.98	4-Methyl-1,2-benzenediol	9.16	1.37

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยการศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพของฟางข้าวจากการไพโรไลซิสแบบเร็ว สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของฟางข้าว

จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของฟางข้าว พบว่าองค์ประกอบของฟางข้าวประกอบไปด้วย ความชื้นมีปริมาณร้อยละ 6.09 เถ้าร้อยละ 15.88 สารระเหยร้อยละ 63.86 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 14.18 เมื่อวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) พบว่าฟางข้าวจะประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 37.30 ไฮโดรเจนร้อยละ 5.63 ไนโตรเจน 1.10 กำมะถันร้อยละ 0.18 และออกซิเจนร้อยละ 55.80 และค่าความร้อนของฟางข้าวมีค่า 15.82 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

5.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของฟางข้าว

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของฟางข้าวด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric analysis, TGA) พบว่าฟางข้าวมีค่าการสลายตัวทางความร้อนตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิที่ 350 - 600 องศาเซลเซียส และสลายตัวค่อนข้างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

5.1.3 การวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฟางข้าว

การวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฟางข้าวด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-Ray Fluorescence) พบว่าในฟางข้าวประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ7.43 โพแทสเซียมไดออกไซด์ (K_2O) ร้อยละ 2.35 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 1.21 และไดฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 0.64 โดยพบว่าธาตุส่วนใหญ่จะอยู่ในหมู่อัลคาไลน์ (Alkali) และอัลคาไลน์เฮิร์ธ (Alkali earth)

5.1.4 ภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว

การทดลองภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิส คือที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคในช่วง 0.425 – 0.600 มิลลิเมตร อัตราการป้อนสาร 2.11กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ38.23

5.1.5 อัตราส่วนน้ำมันเบาต่อน้ำมันหนัก

การไพโรไลซิสพบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสจะสามารถที่แบ่งได้ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของน้ำมันเบาและส่วนของน้ำมันหนัก โดยมีสัดส่วนของน้ำมันเบาร้อยละ 33.03 และน้ำมันหนัก ร้อยละ18.32 หรืออัตราส่วนน้ำมันหนักต่อน้ำมันเบา 1 ต่อ 1.8

5.1.6 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิตั้งแต่ 350 – 600 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 23 - 29 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และค่าความร้อนของถ่านชาร์จากการทดลองอยู่ในช่วงประมาณ 15 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

5.1.7 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์พบว่าในน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ โดยองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพมีค่ามากสุดที่ร้อยละ 62.02 และในถ่านชาร์จะมีองค์ประกอบของออกซิเจนมากที่สุดที่ร้อยละ 69.76

5.1.8 สมบัติพื้นฐานต่างๆของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพจะมีค่าความร้อนอยู่ที่ 28.20 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าความหนาแน่นที่ 1105.21 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความหนืดเท่ากับ 0.81 เซนติสโตก ร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนที่เหลือมีค่า 3.52 ร้อยละโดยน้ำหนักขี้เถ้ามีค่า 16.76 ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 3.34 และจุดวาบไฟที่ 72 องศาเซลเซียส

5.1.9 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิต่างๆ

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆพบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ของแก๊สมีองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณร้อยละ 39.57 คาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณร้อยละ 41.91 นอกจากนั้นยังมีแก๊สไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 16.69 และแก๊สมีเทนปริมาณร้อยละ 1.83

5.1.10 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของทั้งสารประกอบของหมู่ออกซิเจน (Oxygen containing compounds) และ กลุ่มไฮโดรคาร์บอน โดยสารประกอบของหมู่ออกซิเจนได้แก่ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน เอสเทอร์ ซึ่งจะเห็นได้จากพีคของ O–H, C=O, C-H in-plane และกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ซึ่งได้แก่ อะโรมาติก แอลเคน แอลคีนจะเห็นได้จากพีคของ C-H, C=C, C-H

5.1.11 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโครปี (^{1}H-NMR)

น้ำมันชีวภาพจะประกอบไปด้วยกลุ่มของอะโรมาติก ที่ตำแหน่ง 6.19-7.73 ppm มีปริมาณร้อยละ 22.16 อะลิฟาติกที่เชื่อมต่อกับออกซิเจนที่ตำแหน่ง 3.34-5.57 ppm มีปริมาณร้อยละ 19.94 อะลิฟาติกที่เชื่อมต่อกับกลุ่มอะโรมาติกและแอลคีนที่ตำแหน่ง 1.98-2.67 ppm มีปริมาณร้อยละ 19.52 และอะลิฟาติกที่เชื่อมต่อกับสารอื่นๆ ที่ตำแหน่ง 0.81-1.87 ppm มีปริมาณร้อยละ 38.38 ทำให้สรุปได้ว่าในน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของอะโรมาติกและไฮโดรคาร์บอน

5.1.8 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปกโตรเมทรี

(Gas Chromatography-Mass Spectroscopy)

น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ เช่น acetic acid, 1, 2-benzenediol, hexane, hydroxyacetone, propanoic acid, o-methoxyphenol, 2-methoxyphenethyl alcohol และ phenol เป็นต้น โดยสารที่พบในน้ำมันชีวภาพจะเป็นสารประกอบคีโตนและแอลกอฮอลล์ เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังพบสารประกอบฟีนอลด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ระบบการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องในส่วนของตัวแยกสารจะมีน้ำมันเกาะติดอยู่เป็นจำนวนมากหากแก้ไขได้โดยการให้ความร้อนบริเวณตัวเก็บสารมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ก็จะสามารถเก็บน้ำมันในส่วนนี้ได้และจะได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เพิ่มขึ้นได้
2) น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสจะต้องมีการกลั่นแยกเอาน้ำออกก่อนเพื่อขจัดความชื้นออกไป โดยน้ำมันชีวภาพผ่านการขจัดน้ำออกไปแล้วสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้โดยการนำไปใช้งานร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น หรือทำการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้
3) เนื่องจากน้ำมันชีวภาพจะมีความเป็นกรด ดังนั้นในการนำน้ำมันชีวภาพที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงแล้วเมื่อ ไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล ต้องมีการเปลี่ยนปั๊มป์และระบบหัวฉีดภายใน ให้

ใช้กับน้ำมันชีวภาพได้ ซึ่งจากรายงานที่ผ่านมาน้ำมันชีวภาพสามารถใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงแบบแก๊สได้

4) ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสสามารถนำไปปรับสภาพเพื่อใช้เป็นตัวรองรับ เป็นตัวดูดซับ หรือทำเป็นถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังนำไปใช้ปรับสภาพดินให้มีแร่ธาตุอาหารมากขึ้น หรือนำไปอัดแท่งขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็งได้
5) ฟางข้าวที่นำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ต่ำ เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อมลภาวะสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่าแก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล
6) ในการทดลองพบว่าจะมีส่วนของฟางข้าวที่ป้อนเข้าสู่ระบบติดข้างอยู่ในภายในเตาเผาโดยเป็นผลทำให้ค่าจากการทดลองที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มปริมาณการป้อนฟางข้าวให้มากขึ้นเพื่อเป็นการลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น และฟางข้าวที่นำมาใช้ควรผ่านการอบให้มีความชื้นต่ำๆก่อนนำมาทดลองเพื่อลดสัดส่วนของน้ำที่เกิดในผลิตภัณฑ์ของเหลว
7) ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ขยายต่อในระดับเชิงพาณิชย์ได้ โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้มาเป็นข้อมูลอ้างอิงในการพัฒนาพลังงานทางเลือกจากชีวมวลได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] อุตสาห์ บุญบำรุง. พลังงานชีวมวล. แหล่งพลังงานสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2546.

[2] กะลาปาล์ม (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.thaienv.com [2553, กรกฎาคม 10]

[3] ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์. การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

[4] พื้นที่เพาะปลูก (ออนไลน์). แหล่งที่มา : www.oae.go.th/ [2553, สิงหาคม10].

[5] การใช้ชีวมวลในประเทศไทยระหว่างปี 2546–2551 (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.dede.go.th/dede/index. [2553, สิงหาคม10].

[6] ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.dede.go.th/dede/ [2553, สิงหาคม 10].

[7] เซลลูโลส (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.nature.com/nature/ [2553, สิงหาคม 10].

[8] นคร ทิพยาวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2552.

[9] กลูโคสในเซลลูโลส (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.nzetc.org/ [2553, สิงหาคม 10].

[10] ไมโครไฟบริล (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://access.mmhs.ca/docs/ [2553, สิงหาคม 10].

[11] ระวีวรรณ แกล้วกล้า. การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.

[12] เฮมิเซลลูโลส (ออนไลน์). แหล่งที่มา : www.tionbiotech.com/lentin_ [2553, สิงหาคม 10].

[13] Othmer D.F. Encyclopedia of Chemical Technology, 2th ed. Volume 2. New York: John Wiley & Son, 1968.

[14] Winkelman G. M. Degration of Natural Product. New York: VCH Publisher, 1992.

[15] ลิกนิน (ออนไลน์). แหล่งที่มา : www.research.uky.edu/green_energy [2553, สิงหาคม 12].

[16] แกลบ (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.mcgreenpower.com/. [2553, สิงหาคม 13].

[17] ชานอ้อย (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://mblog.manager.co.th/. [2553, สิงหาคม 13].

[18] กากปาล์ม (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.etawau.com/OilPalm [2553, สิงหาคม 13].

[19] เศษไม้ (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.argeholzgas.at/benefits. [2553, สิงหาคม 13].

[20] ซังข้าวโพด (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://anggate.multiply.com/journal/item/95 [2553, สิงหาคม 13].

[21] เอกสารเผยแพร่. เหง้ามันสำปะหลัง. ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณวาจกกสิกิจฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.

[22] เหง้ามันสำปะหลัง (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.rdi.ku.ac.th/ [2553, สิงหาคม 13].

[23] ผักตบชวา (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.school.net.th/library/ [2553, สิงหาคม 20].

[24] ข้าว (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://th.wikipedia.org/wiki/ [2553, สิงหาคม 18].

[25] ฟางข้าว (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://dankhunthot.khorat.doae.go.th/e_rice/rice1.html [2553, สิงหาคม 18].

[26] ฟางข้าว (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.hedfangdin.ob.tc/ [2553, สิงหาคม 18].

[27] ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล (Biomass Clearing House) มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (Energy for Environment Foundation). ชีวมวล. กรุงเทพฯ : คิว พริ้นท์ แมเนจเม้นท์ จำกัด, 2545.

[28] Demirbas A. Calculation of higher heating value of biomass fuel. Fuel 76(1997): 431-434.

[29] พืชชีวมวล (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http://www.efe.or.th [2553, สิงหาคม 17].

[30] Mohan D., Pittman C., and Steele P.H. pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. Energy &Fuels 20 (2006): 848-889.

[31] Nikitin N.I., et al. The chemistry of cellulose and wood. Acadamy of Science of the USSR, Institute of High Molecular Compound: Moscow-Leningrad, 1962.

[32] Bridgewater A.V. and Bridge S.A. Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization. Elsevier Applied Science (1991): 11.

[33] Antal Jr. M.J. Biomass Pyrolysis: A Review of Literature Part 1-Carbohydrate Pyrolysis. Part 2-Lignocellulose Pyrolysis. Advance in Solar Energy, 1982

[34] Donald L. Klass. Biomass for Renewable Energy Fuel and Chemical. Academy Press Limited, 1998.

[35] Pyrolysis (Online). Available from: Blogs.princeton.edu/.../01 [2010, August 19]

[36] ชูศักดิ์ โกกะนุทรานนท์. การคาร์บอไนซ์แกลบในฟลูอิไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

[37] Maniatis K.and Buekens, A. Fast pyrolysis of biomass A.V. Bridgewater and J.L.Kuester. Research in thermochemical biomass conversion. Great Britain Science (1998): 179-189.

[38] Xianwen D., Chuangzhi W., Haibin Li and Yong C. The Fast Pyrolysis of Biomass in CFB reactor. Energy Fuels 14 (2000): 552-557

[39] Zanzi R., Sjostrom K. and Bjornbom E. Rapid high temperature pyrolysis of biomass in a free fall. Fuel 75 (1996): 545-550

[40] Tanaka H., Putalum W., Tsuzaki C., Shoyama Y., Seebauer V., Petek J. and Staudinger G. Effect of particles size, heating rate and pressure on measurement of pyrolysis kinetics by thermo gravimetric analysis. Fuel 76 (1997): 1277-1282.

[41] ฉัตรชัย ธนศรีสุข. การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

[42] Boateng A.A., Jung H.G. and Adler P.R. Pyrolysis of energy crops including alfalfa stems, reed canarygrass. Fuel 85 (2006): 2450–2457.

[43] Olofsson I., Nordin A. and Soderlind U. Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for cost-efficient medium-scale gasification for biomass to liquids fuels. ETPC Report, (2005).

[44] Ates F., Putun E., Putun A.E. Fast pyrolysis of sesame stalk: yields and structural analysis of bio-oil. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 71 (2004): 779 – 790.

[45] Jale Y., Christoph K., Mehmet S. and Mithat Y. Fast pyrolysis of agricultural wastes: Characterization of pyrolysis products. Fuel Processing Technology 88 (2007): 942–9476

[46] Worasuwannarak N., Sonobe T. and Tanthapanichakoon W. Pyrolysis behavior of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 78 (2007): 265-271.

[47] Ayse P. E., Esin A. and Ersan P. Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis. Energy 29 (2004): 2171–2180.

[48] Zheng J.L., Yi W.M. and Wang N. Bio-oil production from cotton stalk. Energy Conversion and Management 49 (2008): 1742-1730.

[49] Nurgul O., Esin A.V., Basak B.U. and Ayse P.E. Characterization of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis. Energy 33 (2008): 1233– 1240.

[50] วิทยา ปั้นสุวรรณ. ไพโรไลซีสของเมล็ดสบู่ดำ. เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. สาขาวิทยาศาสตร์ สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.

[51] Qiang L., Li W.Z. and Zhu X.F. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. Energy Conversion and Management 50 (2009): 1376–1383.

[52] ธนิฎา ฤกษ์หิรัญโชติ, ศุภานัน โชคเฮงตระกูล และ อภิญญา ดวงจันทร์. น้ำมันชีวภาพจากการสลายมวลชีวภาพประเภทหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.

[53] sadullah M., Rahman M.A., Ali M.M., Rahman M.S. and Motin M.A. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. Fuel 86 (2007): 2514-2520.

[54] สินินาฏ รอดจีน. ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

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

[56] Lu Q., Yang X.L. and Zhu X.F. Analysis on chemical and properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. Journal Analytical and Applied Pyrolysis 82 (2008): 191-198.

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

[58] Sensoz S., Angin D. and Yorgun S. Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (Brassica naous L.): fuel properties of bio-oil. Biomass & Bioenergy 19 (2000): 271-279.

[59] Skahill J.W., Diebold J.P. and Feik C.J. Removal of residual char fines from pyrolysis vapors by hot gas filtration. In: Bridgewater AV, editor. Developments in thermochemical biomass conversion. London: Blackie Academic & Professional (1997):253

[60] Williams P.T., Reed A.R... Pre-formed activated carbon matting derived from the pyrolysis of biomass natural fibre textile waste. Journal Analytical and Applied Pyrolysis 70 (2003): 563–577.

[61] Das P., Sreelatha T. and Ganesh A. Bio oil from pyrolysis of cashew nut shell-characterisation and related properties. Biomass Bioenergy 27 (2004): 265–75.

[62] สุพจน์ แหวนเพ็ชร. การผลิตน้ำมันชีวภาพจากผักตบชวาโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[63] Viscosity (Online). Available from: www.efe.or.th [2010, August 19]

[64] สารระเหยในน้ำมัน (ออนไลน์). แหล่งที่มา : www.etoyotaclub.net [2553, สิงหาคม 23]

[65] Lu Q., Yang X.L. and Zhu X.F. Analysis on chemical and properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. Journal Analytical and Applied Pyrolysis 82 (2008): 191-198.

[66] Pereira R.G., Oliverira C.D., Oliverira J.L. Oliverira P.C., Fellows P.C.P, Fellows C.E. and Piamba O.E. Exhaust emissions and electric energy generation in a stationary engine using blends of diesel and soybean biodiesel. Renewable Energy 32 (2007): 2453-2460.

[67] Copper strip corrosion (Online). Available from: www.fordfocusclub.com/forum/index [2010, August 19]

[68] Oasmaa A., Leppamaki E., Koponen P., Levander J. and Tapola E. Physical characterization of biomass-based pyrolysis liquids. Application of standard fuel oil analyses. Technical Research Centre of Finland; 1997.

[69] Sensoz S. and evgi I.K. Bio-oil production from soybean (Glycine max L.); fuel properties of Bio-oil. Industrial Crops and Product 23 (2006): 99-105.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

1. การวิเคราะห์เชื้อเพลิงแบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172-D3175

1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างเชื้อเพลิง (Standard Test Method for moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3173)

หลักการ

นำตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไป

เครื่องมือ

1. เตาอบ
2. ครูซิเบิล
3. เดซิเคเตอร์

วิธีการทดลอง

1. อบครูซิเบิลในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครูซิเบิล
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครูซิเบิล ประมาณ 1 กรัม
3. อบครูซิเบิลพร้อมตัวอย่างในเตาอบโดยไม่ต้องปิดฝา ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครูซิเบิลพร้อมตัวอย่าง

การคำนวณ

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

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_2 = น้ำหนักของครูซิเบิล (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของครูซิเบิลที่มีตัวอย่างผ่านการอบ 105 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 ปริมาณเถ้าในตัวอย่างเชื้อเพลิง (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3174)

หลักการ

นำตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่

เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ครูซิเบิลพร้อมฝา
3. เดซิเคเตอร์

วิธีการทดลอง

1. เผาครูซิเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครูซิเบิลพร้อมฝา
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งใส่ครูซิเบิล ประมาณ 1 กรัม
3. ใส่ครูซิเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
4. นำครูซิเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

การคำนวณ

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

เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า

W_3 = น้ำหนักของครูซิเบิลที่มีเถ้า (กรัม)

W_4 = น้ำหนักของครูซิเบิล (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างเชื้อเพลิง (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3175)

หลักการ

นำตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ครูซิเบิลพร้อมฝา
3. เดซิเคเตอร์

วิธีการทดลอง

1. เผาครูซิเบิลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครูซิเบิลพร้อมฝา บันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างแห้งใส่ในครูซิเบิลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
3. นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
4. หย่อนครูซิเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
5. หย่อนครูซิเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
6. นำครูซิเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

การคำนวณ

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

เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย

W_5 = น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W_6 = น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

M = ร้อยละของความชื้น

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างเชื้อเพลิง

การคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 - A - V - M

เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า
V = ร้อยละของสารระเหย
M = ร้อยละของความชื้น

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

หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์ จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำ (ก่อนและหลังจุดระเบิด) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ภายใต้ภาวะเดียวกัน

เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter

สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดเบนโซอิก (C_6H_5COOH) ควรได้รับมาตรฐานของ National Institute of Standard and Technology
3. เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) เมทิลเรด (Methyl Red) หรือเมทิลเพอเพิล (Methyl Purple)
4. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
5. สารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.0709 นอร์มัล (3.76 กรัมต่อลิตร) สารละลายนี้ปริมาตร 1 มิลลิลิตรมีค่าเท่ากับ 1 แคลอรี
6. น้ำล้างบอมบ์ละลายสารละลายเมทิลออเรนจ์อิ่มตัว 1 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 1 ลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอริมิเตอร์

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ให้ลวดแตะผิวตัวอย่างในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ และต้องเท่ากันทุกครั้ง ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิปริมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิของห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิคงที่
8. เมื่ออุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น (T_i) กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย (T_f)
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อยๆลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเผาไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้
12. วัดความยาวลวดที่เหลือ บันทึกผล

การคำนวณ

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

เมื่อ

E = ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (จูลต่อองศาเซลเซียส)

H = ความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (จูลต่อกรัม)

g = น้ำหนักกรัมเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)

e_1 = ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย1 มิลลิลิตรเทียบกับ 10 บีทียู

e_2 = ความยาวลวดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) x ค่าความร้อนของลวด (บีทียูต่อเซนติเมตร)

T = T_f-T_i ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิกเป็นตัวอย่างเชื้อเพลิงแล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ Q_v (gross) = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (จูลต่อกรัม)

T = T_f-T_i (องศาเซลเซียส)

e_1 = ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย1 มิลลิลิตรเทียบกับ10 บีทียู

e_2 = ความยาวลวดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) x ค่าความร้อนของลวด (บีทียูต่อเซนติเมตร)

e_3 = $25x10^3$ (จูล) x ร้อยละกำมะถัน x น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ (กรัม)

3. การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรวม (Standard Test Method for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3177 Method B: Bomb Washing Method)

หลักการ

กำมะถันจากน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์ จะถูกทำให้อยู่ในรูปตะกอนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$)

เครื่องมือ

1. เตาเผา (Muffle furnance)
2. ครูซิเบิล
3. เดซิเคเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (Conc. NH_4OH) ความถ่วงจำเพาะ 0.90
3. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (1+10) โดยผสมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 10 ส่วนโดยปริมาตร
4. กรดไฮโดรคลอริก (1+1) โดยผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 1 ส่วนโดยปริมาตร
5. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) ละลายแบเรียมคลอไรด์ 100 กรัมในน้ำและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
6. สารละลายซิเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.43 กรัมในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรสารละลายให้เป็น 100 มิลลิลิตร
7. กระดาษกรองเบอร์ 1 และเบอร์ 42

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์และไตเตรตแล้วมาปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (จาก pH = 5.5 เป็น pH =7.0)
2. นำไปต้มจนเดือดแล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างกระดาษกรองให้ทั่วด้วยน้ำร้อน 5-6 ครั้ง
3. เติมกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร นำไปต้มและเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตรทีละน้อยด้วยปิเปต คนให้ทั่วตลอดเวลา ต้มต่อให้เดือดอีก 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
4. กรองตะกอนแบเรียมซัลเฟตด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดแบเรียมคลอไรด์ (ทดสอบได้ด้วยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในน้ำล้างตะกอน 8-10 มิลลิลิตรแล้วน้ำไม่ขุ่น)
5. นำกระดาษกรองที่มีตะกอนแบเรียมซัลเฟตใส่ครูซิเบิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ห่อกระดาษหลวมๆเพื่อป้องกันตะกอนกระเด็นออกจากถ้วย
6. เผาที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ นำออกจากเตาเผา ปิดฝาและทิ้งให้เย็น
7. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

การคำนวณ

ร้อยละกำมะถันรวม = 13.738 x (A - B) / C

เมื่อ A = น้ำหนักของครูซิเบิลรวมกับน้ำหนักตะกอนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) (กรัม)

B = น้ำหนักของครูซิเบิล (กรัม)

C = น้ำหนักของเชื้อเพลิงเริ่มต้น (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

การคำนวณ

1. **การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว**

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

2. **การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง**

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

3. **การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส**

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (Daf) = 100 – ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว - ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง

โดย

W_{Daf} = น้ำหนักของผักตบเริ่มต้นที่ปราศจากความชื้น

W_{R} = น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้น

W_{Liq} = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว

4. **การคำนวณอัตราการไหลของแก๊สและเวลาที่ทำปฏิกิริยา**

อัตราการป้อน(Feed rate) = $W_{rice\ staw} / t$ (Kg/hr)

เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Residence time) = $t / W_{rice\ staw}$ (sec)

โดย

$W_{rice\ staw}$ = น้ำหนักของฟางข้าวที่ได้ออกมาจากเตาปฏิกรณ์

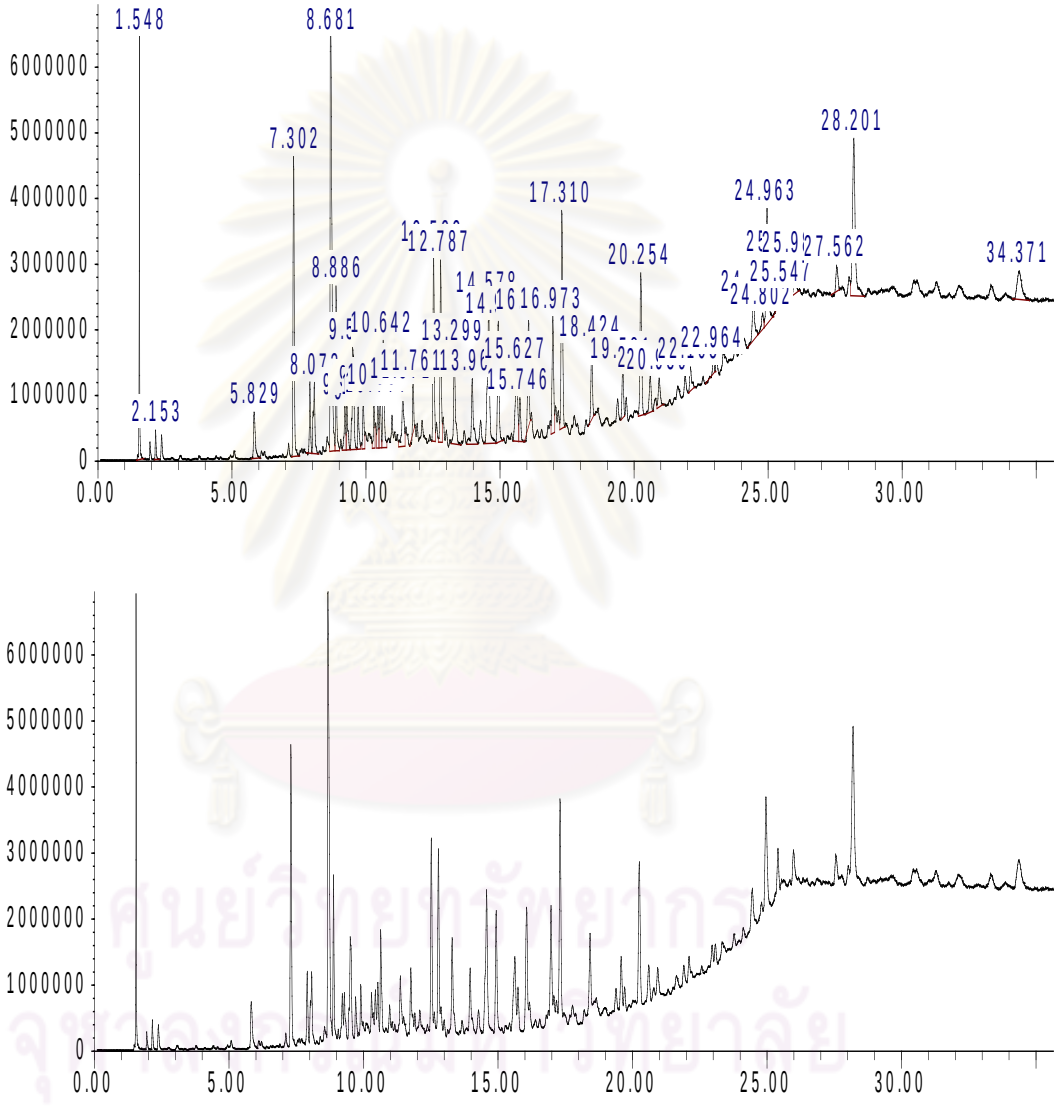
t = เวลาทั้งหมดที่ฟางข้าวออกมาจากเตาปฏิกรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

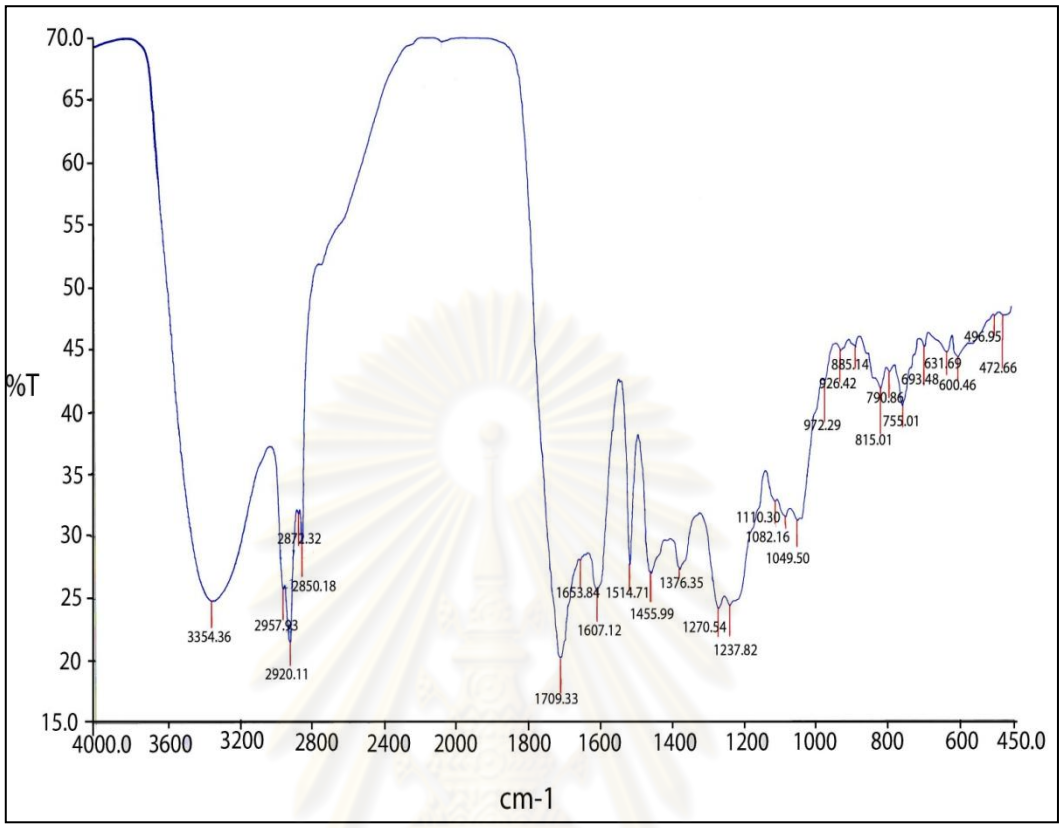
การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ

1. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสเปกโทรสโกปี



รูปที่ ค.1 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบต่าง ๆ ของ น้ำมันชีวภาพด้วย GC/MS

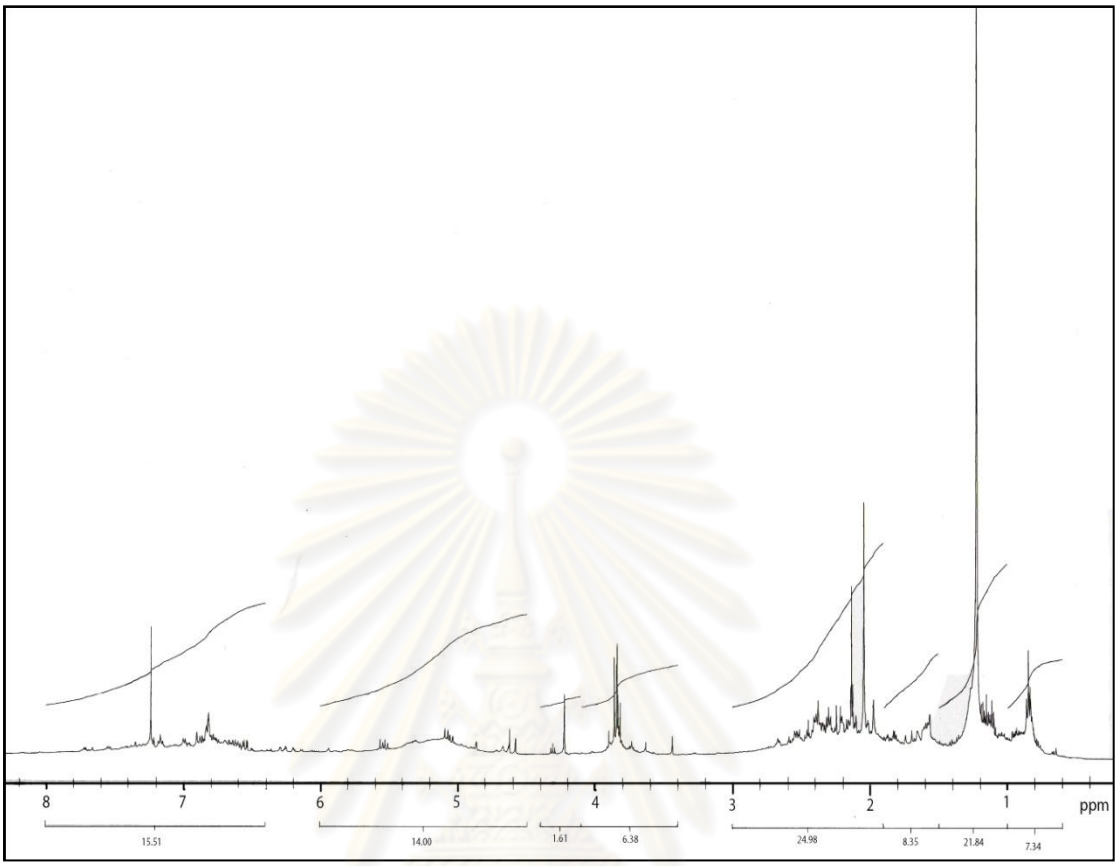
2. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวด้วยเทคนิค FTIR



รูปที่ ค.2 FTIR สเปกตรัมขององค์ประกอบต่างๆของน้ำมันชีวภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR



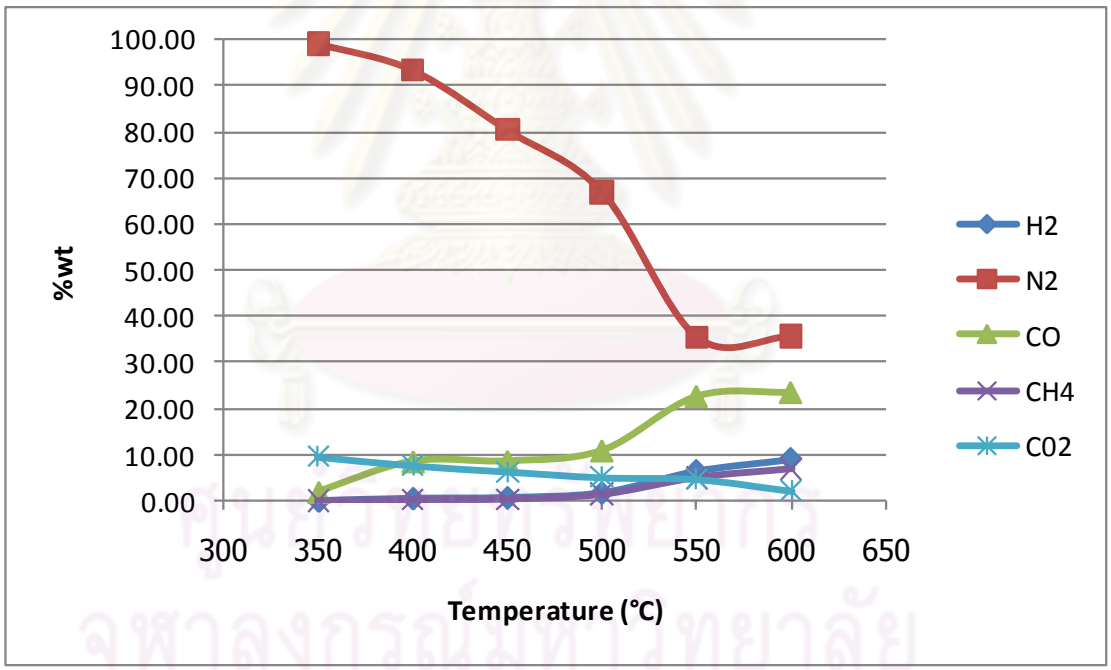
รูปที่ ค.3 ^{1}H-NMR สเปกตรัมของน้ำมันชีวภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าวด้วยเทคนิค GC

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าวด้วยเทคนิค GC

	H_2	N_2	CO	CH_4	CO_2
STD	44283.7	371578.7	2893.2	9625.6	11008.6
350 °C	1550.3	387789.4	5433.1	335.4	104815.4
400 °C	24187.9	365290.6	24754.8	2496.2	83988.6
450 °C	31934.7	314469.9	24930.2	3621.6	69557.0
500 °C	78227.6	261999.6	31651.7	13490.1	55692.8
550 °C	285900.3	139009.4	66027.4	48023.6	51341.2
600 °C	398923.2	139864.4	68457.5	66004.2	23424.4



รูปที่ ค.4 การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าวด้วยเทคนิค GC

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกีรติณัฏฐ์ ธนกิจธรรมกุล เกิดเมื่อวันที่ 20 มกราคม 2528 ที่จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเชียงคำวิทยาคม จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย