

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไพโรไลซิสของ *Ceratophyllum demersum* L. โดยใช้โดโลไมต์ในเครื่อง
ปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIQUID FUEL PRODUCTION FROM PYROLYSIS OF *Ceratophyllum demersum* L. USING
DOLOMITE IN CONTINUOUS REACTOR



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไฟโรไลซิส ของ <i>Ceratophyllum demersum</i> L. โดยใช้โดโลไมต์ใน เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
โดย	นายฐานันดร ประกอบ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชุลธารา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

ฐานันดร ประกอบ : การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไพโรไลซิส
 ของ *Ceratophyllum demersum* L. โดยใช้โดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. (LIQUID FUEL PRODUCTION FROM PYROLYSIS OF *Ceratophyllum demersum* L. USING DOLOMITE IN CONTINUOUS REACTOR) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ธรา พงษ์ วิทิตสานต์

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของมหาหุ่ยพวงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์บนเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องเพื่อศึกษาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพที่สูงสุดและมีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ โดยปัจจัยที่สนใจในการศึกษานี้ประกอบด้วย อุณหภูมิ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย อัตราการป้อนของสารชีวมวล อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา ซึ่งผลการวิจัยพบว่าภาวะดำเนินการที่ให้ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุด 41.87% ได้แก่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคมหาหุ่ย 250-500 ไมครอน อัตราการป้อนสารตั้งต้น 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร่วมในปฏิกิริยาไพโรไลซิสในปริมาณร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้โดโลไมต์ร่วมในปฏิกิริยาทำให้มีแก๊สที่ไม่ควบแน่นเกิดมากขึ้น ในขณะที่ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพมีปริมาณลดลง เมื่อวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรเมตรี พบว่าน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวก อะโรมาติกและสารประกอบออกซิเจนเนต โดยมีค่าความร้อนสูง 19.26 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เคมีเทคนิค
 ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5971943723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Macro algae, Bio oil, Pyrolysis, Dolomite, Continuous reactor

Thanandorn Prakob :
 LIQUID FUEL PRODUCTION FROM PYROLYSIS OF *Ceratophyllum demersum*
 L. USING DOLOMITE IN CONTINUOUS REACTOR. Advisor: Prof. Tharapong
 Vitidsant, Ph.D.

This research was focused on production of liquid fuel (bio-oil) from pyrolysis of *Ceratophyllum demersum* L. which is a type of macro algae. The reaction was conducted in continuous reactor by using dolomite as catalyst. The effects of pyrolysis parameters were investigated which included pyrolysis temperature, particle size, feed rate and nitrogen flow rate. The bio-oil, solid and gas product yield were determined. The experimental results showed the maximum liquid products yield of 41.87% at the pyrolysis temperature of 550 °C, particle size range of 250-500 micron. fixed feed rate at 1.13 kg/hr and nitrogen flow rate of 160 ml/min. After that, effects of using dolomite catalysts (5, 10 and 20 %wt.) were investigated. The results showed that liquid product yield tend to decrease when amount of catalyst was increased while gaseous product yield increased which the maximum gaseous product yield was 31.13 %. Moreover, addition of dolomite catalyst influenced on increasing of lighter hydrocarbon in liquid products which could be used as liquid fuels. From characterization of liquid products physical and chemical properties, it was found that the major components of bio-oil are aromatic compounds and gaseous products are methane. As well as, the heating value of bio-oil was 19.26 MJ/kg.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและเสนอแนวทาง พร้อมให้คำแนะนำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ช่วยแสดงความคิดเห็นในการปรับปรุงงานวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา และรองศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาเข้าร่วมการสอบวิทยานิพนธ์และช่วยให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมทั้งแก้ไขจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานวิจัยเพื่อให้เกิดความถูกต้องและสมบูรณ์ในงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology ; PETROMAT) สำหรับการให้ทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคลากรภายในศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงห้องปฏิบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่างๆ และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ช่วยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจในการทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ฐานันดร ประกอบ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	
กิตติกรรมประกาศ.....จ	
สารบัญ.....ฉ	
บทที่ 1 บทนำ.....17	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....17	
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....18	
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....18	
1.4 ขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัย.....18	
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....20	
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....21	
2.1 ปิโตรเลียม (Petroleum).....21	
2.1.1 น้ำมันดิบ (Crude Oil).....22	
2.1.2 แก๊สธรรมชาติ (Natural Gas).....23	
2.2 พลังงานทดแทน.....24	
2.2.1 ประเภทของพลังงานทดแทน.....24	
2.3 ชีวมวล (Biomass).....26	
2.3.1 ศักยภาพชีวมวล.....27	
2.4 องค์ประกอบของชีวมวล.....29	
2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose).....29	
2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....30	

2.4.3	ลิกนิน (Lignin).....	31
2.4.4	โปรตีน (Protein).....	32
2.5	องค์ประกอบของชีวมวล.....	32
2.5.1	ความชื้น (Moisture).....	33
2.5.2	ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance).....	33
2.5.3	ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือเถ้า (Ash).....	33
2.6	พลังงานที่ได้จากชีวมวล.....	33
2.7	ข้อดีและข้อเสียของพลังงานชีวมวล.....	34
2.8	การแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง.....	35
2.8.1	การเผาไหม้ (Direct-Fired, Combustion).....	36
2.8.2	ลิกวิแฟกชัน (Liquefaction).....	37
2.8.3	แกซิฟิเคชัน (Gasification).....	38
2.8.4	ไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	39
2.8.5	ประเภทของไพโรไลซิส.....	40
2.8.6	ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการไพโรไลซิส.....	41
2.8.7	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	43
2.9	น้ำมันชีวภาพ.....	44
2.9.1	ลักษณะทั่วไปของน้ำมันชีวภาพ.....	44
2.9.2	สมบัติของน้ำมันชีวภาพ.....	45
2.9.3	การใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพ.....	46
2.10	ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์.....	46
2.10.1	เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองอากาศ.....	46
2.10.2	เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่างไอออน.....	47
2.10.3	เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ.....	48

2.10.4 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทิป	48
2.10.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู	49
2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)	49
2.11.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	50
2.12 โดโลไมต์ (Dolomite)	50
2.12.1 สมบัติทั่วไปของโดโลไมต์	51
2.12.2 ประโยชน์ของโดโลไมต์	51
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	52
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย	54
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	54
3.2 สารตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	59
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	59
3.3.1 การเตรียมสารตั้งต้นและวิเคราะห์ชีวมวล	60
3.3.2 ออกแบบการทดลอง	60
3.3.3 วิธีการทดลอง	61
3.3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของผลิตภัณฑ์	62
3.4 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง	62
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	64
4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของมหาห่วยพุงชะโด	64
4.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของมหาห่วยพุงชะโดด้วยเทคนิคเทอร์โมกรา วิเมตริก	64
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบปริมาณและแยกธาตุของมหาห่วยพุงชะโด	65
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์	66

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD).....	66
4.2.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).....	67
4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET).....	68
4.2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)	69
4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากมหาสารรายพุงชะโด.....	70
4.3.1 ผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้ต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟโรไลซิสมห สารรายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	70
4.3.2 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟโรไลซิสมหสารราย ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	72
4.3.3 ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟโรไลซิสมห สารรายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	73
4.3.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟโรไลซิ สมหสารรายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	75
4.4 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม	76
4.5 ผลการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันหนักและน้ำมันเบาในผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	78
4.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟโรไลซิสมห สารรายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	79
4.6.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไฟโรไลซิ สมหสารราย	79
4.6.2 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพจากมหาสารราย	85
4.6.2.1 ค่าความหนืดและความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพจากมหาสารราย	86
4.6.2.2 ค่าความเป็นกรดเบสของน้ำมันชีวภาพจากมหาสารราย.....	86

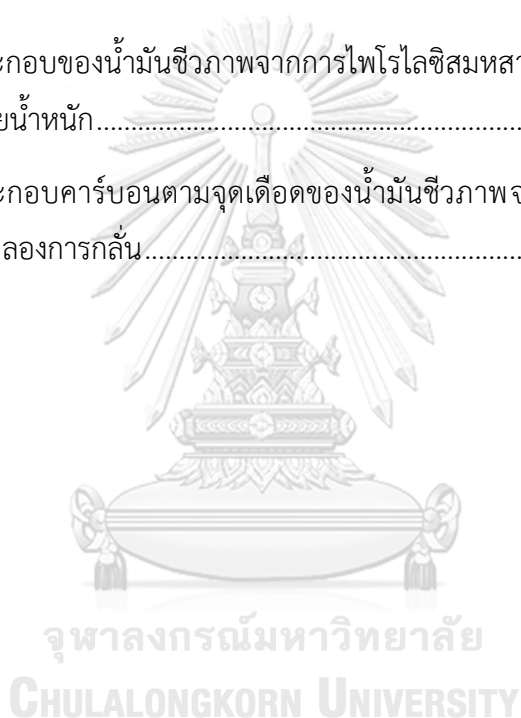
4.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสมหาหรัายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	86
4.7.1 ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากมหาหรัายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์.....	87
4.7.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สจากการไพโรไลซิสมหาหรัายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	90
4.7.3 ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากมหาหรัายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการทดลอง	93
5.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของมหาหรัาย	93
5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นทางของมหาหรัาย.....	93
5.1.3 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของมหาหรัายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง...93	
5.1.4 ศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม.....	94
5.1.5 ศึกษาผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสมหาหรัายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	94
5.1.6 ศึกษาผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสมหาหรัายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	95
5.1.6.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์.....	95
5.1.6.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	95
5.1.6.3 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	96

ภาคผนวก ก.	98
1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis).....	98
1.1 การวิเคราะห์น้ำหรือความชื้น	98
1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า.....	98
1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย.....	99
1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว.....	100
2. การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาห่วย.....	101
3. การศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม	103
4. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาห่วยด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์	103
4.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC).....	103
4.2 แก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS).....	105
5. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาห่วยด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น	123
5.1 แก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Simulation Distillation Gas Chromatography, DGC).....	123
บรรณานุกรม	124
ประวัติผู้เขียน	129

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2560	27
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความร้อนของชีวมวล	34
ตารางที่ 2.3 แสดงประเภทของไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน	41
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ	45
ตารางที่ 2.5 สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันชีวภาพ.....	45
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของมหาหุราย.....	65
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูปทรง (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	68
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ด้วยเทคนิค XRF	69
ตารางที่ 4.4 ผลอัตราส่วนน้ำมันหนักและน้ำมันเบาในผลิตภัณฑ์ของเหลว	78
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากมหาหุรายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	80
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากมหาหุรายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	80
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบองค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากมหาหุรายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	81
ตารางที่ 4.8 ค่าการเปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสมหาหุรายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ และน้ำมันหนักจากแหล่งปิโตรเลียม.....	83
ตารางที่ 4.9 สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพจากมหาหุราย	85
ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยผ่านเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตร	88
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สจากการไพโรไลซิสมหาหุราย.....	90
ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบคาร์บอนตามจุดเดือดของน้ำมันชีวภาพจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น	92

ตารางที่ ก-1 ผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก.....	101
ตารางที่ ก-2 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก	101
ตารางที่ ก-3 ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก.....	102
ตารางที่ ก-4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก...	102
ตารางที่ ข-1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก	103
ตารางที่ ค-1 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไฟโรไลซิสมหาหุรายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	105
ตารางที่ ค-2 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไฟโรไลซิสมหาหุรายมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	112
ตารางที่ ง-1 องค์ประกอบคาร์บอนตามจุดเดือดของน้ำมันชีวภาพจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น.....	123



สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการเกิดปิโตรเลียม	21
รูปที่ 2.2	ประเภทของน้ำมันดิบ	22
รูปที่ 2.3	ชีวมวลที่พบมากในประเทศไทย	26
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของเซลลูโลสในพืช	30
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของเซลลูโลส	30
รูปที่ 2.6	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	31
รูปที่ 2.7	มอนอเมอร์ย่อยของลิกนิน	31
รูปที่ 2.8	โครงสร้างของลิกนิน	32
รูปที่ 2.9	กระบวนการแปรรูปเชิงเคมีความร้อน	36
รูปที่ 2.10	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่อุณหภูมิสูง	37
รูปที่ 2.11	แผนผังการเกิดปฏิกิริยาลิกวิแฟกชัน	38
รูปที่ 2.12	การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างกระบวนการเกิดไพโรไลซิส	40
รูปที่ 2.13	เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบพองอากาศ	47
รูปที่ 2.14	เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน	47
รูปที่ 2.15	เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสูญญากาศ	48
รูปที่ 2.16	เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทิว	48
รูปที่ 2.17	เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู	49
รูปที่ 2.18	การเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	49
รูปที่ 2.19	ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์	51
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัย	54
รูปที่ 3.2	เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัย	55
รูปที่ 3.3	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรมิเตอร์	56
รูปที่ 3.4	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	56

รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น.....	57
รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH.....	57
รูปที่ 3.7 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์.....	58
รูปที่ 3.8 เครื่องไตเตรท.....	58
รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน.....	59
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของมหาหุรายในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และความดันบรรยากาศไนโตรเจน.....	64
รูปที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของ (ก) โดโลไมต์ก่อนแคลไซน์ (ข) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อ ● แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์, □ แคลเซียมไฮดรอกไซด์, ◆ แคลไซด์, ▽ แมกนีเซียมออกไซด์ และ ○ แคลเซียมออกไซด์.....	67
รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของโดโลไมต์ (ก) โดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ (ข) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	68
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก.....	70
รูปที่ 4.5 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก.....	72
รูปที่ 4.6 ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก.....	74
รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก.....	75
รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก.....	76
รูปที่ 4.9 น้ำมันเบา (ก) และน้ำหนักหนัก (ข).....	79
รูปที่ 4.10 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาหุรายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	87
รูปที่ 4.11 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาหุรายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	87
รูปที่ 4.12 โครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่นน้ำมันชีวภาพจากมหาหุรายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	91

รูปที่ 4.13 โครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่นน้ำมัน
ชีวภาพจากมหาวิทยาลัยที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....91



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันพลังงานถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการใช้ชีวิตประจำวัน เช่น การคมนาคม เศรษฐกิจ และการอยู่อาศัย เป็นต้น ทำให้เกิดความจำเป็นต้องใช้ในด้านพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น โดยพลังงานจากแหล่งปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานหนึ่งที่มีความต้องการภายในประเทศอยู่ตลอดเวลา รวมถึงทั่วโลกที่ให้ความสนใจในด้านพลังงานที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียม แต่กลับพบว่าพลังงานจากแหล่งปิโตรเลียมมีแนวโน้มของปริมาณที่ลดลง แต่มีความต้องการใช้ที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดการซื้อ-ขายระหว่างประเทศเกิดขึ้น ดังนั้นการหาพลังงานทดแทนที่สามารถใช้แทนพลังงานจากแหล่งปิโตรเลียมได้จึงถือเป็นทางเลือกใหม่ที่มีความสนใจในปัจจุบัน ในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะศึกษาและค้นคว้าแหล่งทรัพยากรใหม่ๆที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนในเชิงของพลังงานได้ จากแนวคิดดังกล่าวการหาแหล่งทรัพยากรใหม่จะต้องให้ประโยชน์ในแง่ของพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงมีต้นทุนและค่าใช้จ่ายรวมในกระบวนการน้อยที่สุด

โดยชีวมวล (Biomass) [1] ถือเป็นแหล่งทรัพยากรที่มีอยู่ภายในประเทศและมีแนวโน้มการนำมาใช้เป็นพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากชีวมวลเป็นอินทรีย์สารที่มีตามธรรมชาติ สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานและสามารถปลูกทดแทนได้ ซึ่งชีวมวลที่นำมาผลิตเป็นพลังงานนั้น อาทิเช่น กากอ้อยที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาล แกลบที่ได้จากการสีข้าว และจำพวกไม้ยืนต้นที่เหลือจากงานก่อสร้างหรืองานเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น แต่พบว่าชีวมวลเหล่านี้มีความต้องการใช้สูง และมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการนำไปผลิตเป็นพลังงานทดแทน จึงมีการค้นคว้าเพิ่มเติมในด้านทรัพยากรที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน

พบว่ามหาสาหร่าย (Macro algae) [2] เป็นชีวมวลชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับชีวมวลอื่นๆ แต่มหาสาหร่ายเป็นพืชที่อยู่ในแหล่งน้ำหรือทะเล ซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์ไม่กว้างขวางมากนัก โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้เฉพาะเจาะจง เช่น การนำไปทำเป็นยารักษาโรค ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง รวมถึงการนำไปรับประทานเป็นอาหาร เป็นต้น อีกทั้งมหาสาหร่ายเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกน้อย และมีปริมาณที่มากเกินพอ ด้วยเหตุนี้การนำมหาสาหร่ายมาเป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้ ถือตอบโจทย์ในเรื่องของการศึกษาและค้นคว้าในการหาแหล่งทรัพยากรใหม่ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในเชิงพลังงาน

โดยขั้นตอนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นรูปของพลังงานจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ กระบวนการเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion processes) และกระบวนการเชิงเคมีชีวภาพ (Biochemical conversion processes) ซึ่งทั้งสองกระบวนการสามารถเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานได้ แต่กระบวนการเชิงเคมีความร้อนจะตอบสนองความต้องการในรูปแบบของพลังงานมากกว่ากระบวนการเชิงเคมีชีวภาพ เนื่องจากเราต้องการได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอยู่รูปแบบของผลิตภัณฑ์เหลวจึงทำให้กระบวนการเชิงเคมีความร้อน ตอบโจทย์ในด้านของรูปแบบผลิตภัณฑ์มากกว่า นอกจากนี้กระบวนการเชิงเคมีความร้อนยังมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการที่ต่ำกว่า และยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจึงเลือกใช้การเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานด้วยวิธีการเชิงเคมีความร้อน

โดยงานวิจัยนี้เป็นการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากกระบวนการไพโรไลซิสของมหาสาหร่าย (Macroalgae) สายพันธุ์ *Ceratophyllum demersum* L. หรือ สาหร่ายพุงชะโด ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสรวมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาสาหร่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสมหาสาหร่ายโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของมหาสาหร่ายโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสมหาสาหร่าย อาทิเช่น อุณหภูมิไพโรไลซิส ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารตั้งต้น อัตราการป้อนสารตั้งต้นและอัตราการป้อนของแก๊สไนโตรเจน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว รวมถึงการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยดำเนินการศึกษาและวิจัย ณ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี

1.4 ขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับมหาสาหร่ายที่เหมาะสม ในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส
2. เตรียมและจัดหามหาสาหร่าย รวมไปถึงศึกษาเครื่องมือการใช้เครื่องมือในงานวิจัย

3. ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของมหาหรรายก่อนทำปฏิกิริยา
 - วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของมหาหรราย โดยผ่านการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ (Proximate analysis และ Ultimate analysis)
 - วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของมหาหรรายด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis)
4. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส ประกอบด้วย
 - อุณหภูมิที่ใช้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส
 - ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ น้อยกว่า 250 250-500 และ 500-850 ไมครอน
 - อัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 0.41 0.61 1.13 2.91 และ 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
 - อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 80 120 160 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที
5. ศึกษาผลการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ในภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 โดยมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
6. วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส
 - วิเคราะห์สมบัติทางเคมี
 - วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter)
 - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านชาร์
 - วิเคราะห์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรเมทรี (Gas chromatography mass spectrometry)
 - การวิเคราะห์หาประเภทของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Distillation gas chromatography)
 - วิเคราะห์สมบัติทางกาย
 - วิเคราะห์ค่าความหนาแน่น
 - วิเคราะห์ค่าความหนืด
 - วิเคราะห์ปริมาณกรดและด่างในน้ำมันชีวภาพ
7. วิเคราะห์ผล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไฟโรไลซิสของมหาหุร่ายเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



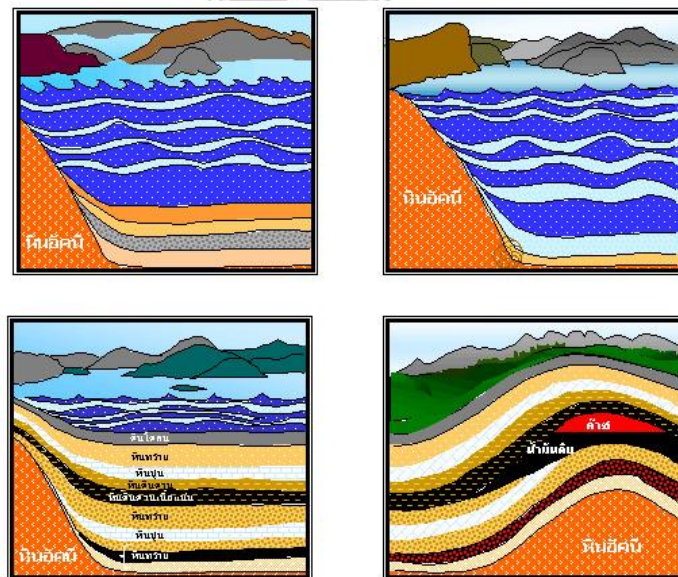
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม (Petroleum)

ปิโตรเลียม [3] เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลต่างกัน ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยเกิดจากการสลายตัวหรือทับถมกันของอินทรีย์สาร ภายใต้ความร้อนและแรงดัน มักพบอยู่ในชั้นหินตะกอน (Sedimentary Rocks) ทั้งในสภาพของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งองค์ประกอบหลักของสารปิโตรเลียมคือคาร์บอนและไฮโดรเจน รวมไปถึงสารประกอบอื่นๆในปริมาณเล็กน้อย เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน กำมะถัน เป็นต้น

การกำเนิดแหล่งปิโตรเลียม เกิดจากการสลายตัวและเปลี่ยนแปลงสภาพของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ดึกดำบรรพ์ โดยตะกอนที่เกิดขึ้นจะถูกกระแสน้ำพัดพาให้มากอง ณ บริเวณที่เป็นทะเลสาบหรือเป็นแอ่ง หลังจากนั้นจะถูกทับถมด้วยชั้นหินต่างๆ อาทิเช่น กรวด ทราย และโคลนสลับกันเป็นชั้นๆ และเกิดการอัดแน่นด้วยความดันผนวกกับความร้อนภายใต้พื้นผิวโลก จึงกลายป็นน้ำมันดิบหรือแก๊สธรรมชาติเกิดขึ้นนั่นเอง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปิโตรเลียม [3]

โดยปิโตรเลียมสามารถแบ่งตามสถานะได้ 2 ชนิดใหญ่ คือ น้ำมันดิบ (Crude Oil) และก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)

แหล่งปิโตรเลียมของประเทศไทย มีการสำรวจค้นพบแหล่งปิโตรเลียมของไทยรวมแล้วมีมากถึง 79 แหล่ง โดยเป็นแหล่งที่สามารถผลิตได้มี 41 แหล่ง โดยแบ่งเป็น

ก) แหล่งปิโตรเลียมบนบก 21 แหล่ง มีการผลิตอยู่ 20 แหล่ง

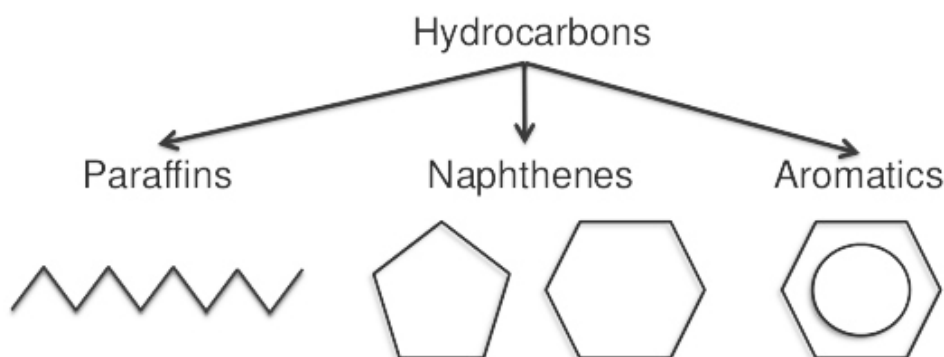
ข) แหล่งปิโตรเลียมในทะเล 58 แหล่ง มีการผลิตอยู่ 21 แหล่ง

ซึ่งในปี พ.ศ. 2545 ประเทศไทยมีการสำรวจปริมาณสำรองของปิโตรเลียมพบว่าแหล่งปิโตรเลียมมีทั้งหมด 2,937 ล้านบาร์เรล (โดยเทียบกับปริมาณน้ำมันดิบ) โดยแบ่งเป็นส่วนของน้ำมันดิบ 313.2 ล้านบาร์เรล ก๊าซธรรมชาติ 12.8 ล้านล้านลูกบาศก์ฟุต และก๊าซธรรมชาติเหลว 297.5 ล้านบาร์เรล [3]

2.1.1 น้ำมันดิบ (Crude Oil)

น้ำมันดิบ [4] มีองค์ประกอบหลักที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะทางกายภาพมีสีเหลืองไปจนถึงสีดำ มีความเหนียวและมีความหนืดสูง โดยเราสามารถแบ่งน้ำมันดิบตามสมบัติและชนิดของไฮโดรคาร์บอนได้ 3 ประเภทใหญ่ คือ

1. น้ำมันดิบชนิดที่ไม่มีไขมากหรือที่เรียกกันว่า พาราฟิน (Paraffin base) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว
2. น้ำมันดิบชนิดที่มียางมะตอยมากหรือที่เรียกกันว่า แนฟทาหรือแนฟทีน (Naphthenic base) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวง ซึ่งแนฟทาในปิโตรเลียมส่วนใหญ่จะเป็นวงห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม โดยวงเหล่านี้สามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบอะโรมาติกได้
3. น้ำมันดิบชนิดผสมหรือที่เรียกกันว่า อะโรมาติก (Aromatics base) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นหกเหลี่ยม อาจจะมีน้ำมันดิบประเภทที่ 1 และ 2 ผสมกันอยู่



รูปที่ 2.2 ประเภทของน้ำมันดิบ [4]

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ (Natural Gas)

แก๊สธรรมชาติ [5] โดยธรรมชาติจะมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุล 1 ถึง 5 อะตอม ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 85 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือจะเป็นสารประกอบอื่นๆ เช่น แก๊สไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณเล็กน้อย

โดยเราสามารถแบ่งแก๊สธรรมชาติตามการใช้งานได้ 2 ประเภทใหญ่ ได้ดังต่อไปนี้

1. แก๊สแห้ง (Dry gas) เป็นแก๊สธรรมชาติที่ไม่มีส่วนผสมของแก๊สธรรมชาติเหลว (Condensate gas) ซึ่งในแก๊สแห้งจะมีร้อยละเปอร์เซ็นต์ของแก๊สมีเทนสูงเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ จึงทำให้มีราคาสูงกว่าแก๊สธรรมชาติชนิดอื่น

2. แก๊สเปียก (Wet gas) เป็นแก๊สธรรมชาติที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแก๊สธรรมชาติเหลว ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอม 4 ถึง 6 อะตอม เช่น โพรเพน บิวเทน เพนเทน และเฮกเซน เป็นต้น โดยแก๊สเปียกจะสามารถกลายเป็นของเหลวได้ง่ายเมื่อมีความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ จึงเกิดปัญหาในด้านการขนส่งแก๊สธรรมชาติ

นอกจากนี้แก๊สธรรมชาติที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำไปใช้งานในปัจจุบันได้ดังต่อไปนี้

แก๊สมีเทน (C_1) เป็นแก๊สธรรมชาติที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก เนื่องจากมีพลังงานความร้อนที่สูง และง่ายต่อการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ ที่เรารู้จักกันในชื่อ “แก๊สธรรมชาติสำหรับรถยนต์” (Natural gas for Vehicles, NGV)

แก๊สอีเทน (C_2) เป็นแก๊สธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น เส้นใย พลาสติก ยางสังเคราะห์ เพื่อนำไปใช้ในการแปรรูปเป็นวัสดุอื่นๆต่อไป

แก๊สโพรเพน (C_3) และแก๊สบิวเทน (C_4) เป็นแก๊สธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเช่นเดียวกับแก๊สอีเทน แต่นิยมนำแก๊สโพรเพนและแก๊สบิวเทนมาผสมกันและอัดลงถังเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) หรือที่รู้จักกันในชื่อ แก๊สหุงต้ม เพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ และโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอื่น

ไฮโดรคาร์บอนเหลว (Heavier hydro carbon) เป็นแก๊สธรรมชาติที่อยู่ในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ แต่ยังมีบางส่วนที่สามารถหลุดออกไปเป็นสถานะแก๊สได้ โดยเราสามารถแยกไฮโดรคาร์บอนเหลวที่มีสถานะแก๊สได้ ขณะทำการขุดเจาะบ่นแท่งผลิต เรียกว่า คอนเดนเสท (Condensate)

ก๊าซโซลีนธรรมชาติ เป็นแก๊สธรรมชาติที่ผสมกับไฮโดรคาร์บอนเหลว หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แก๊สโซลีนธรรมชาติ (Natural Gasoline, NGL)

นอกจากนี้ยังมีแก๊สชนิดอื่นๆที่ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่ต้องผ่านกระบวนการที่แตกต่างกันก่อนเพื่อให้ได้แก๊สที่เหมาะสมตามการใช้งานต่อไป

2.2 พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทน [6] หมายถึงพลังงานที่สามารถใช้ทดแทนพลังงานจากแหล่งพลังงานปิโตรเลียมหรือเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหินปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติ โดยตัวอย่างแหล่งพลังงานทดแทนตามธรรมชาติที่สำคัญในปัจจุบัน ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานเชื้อเพลิงจากชีวมวล เป็นต้น ในปีพุทธศักราช 2555 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนในปริมาณน้อยร้อยละ 18.2 ของพลังงานทั้งหมด ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปี 2554 อยู่เพียง 1.8 เปอร์เซ็นต์ โดยพลังงานแสงอาทิตย์และเชื้อเพลิงชีวมวล เพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 23 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร มีอัตราการลดลงร้อยละ 10 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ เนื่องจากวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรถูกแปรรูปไปอยู่ในพลังงานชีวมวล

โดยปัจจุบันแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน พบว่าการใช้พลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงที่ได้มาจากฟอสซิลนั้นมีปริมาณลดลงอย่างมาก จึงมีการศึกษา ค้นคว้า ทดสอบ พัฒนา และส่งเสริมให้มีแนวคิดในการนำพลังงานในรูปแบบอื่นมาใช้ทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า และเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่นหรือชุมชน เพื่อให้มีการผลิตและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องมีการวางแผน การปลูกจิตสำนึก รวมไปถึงองค์กรที่จะเข้ามาสนับสนุนการนำพลังงานชีวมวลจากแหล่งชุมชนมาใช้ เพื่อให้เกิดประโยชน์ทั้งด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม

2.2.1 ประเภทของพลังงานทดแทน

ประเภทของพลังงานทดแทนในปัจจุบันนั้นมีความหลากหลายมาก เพื่อตอบสนองความต้องการใช้ของปริมาณประชากรที่เพิ่มขึ้น พบว่าหลายองค์กรมีแนวคิดที่จะใช้พลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นพลังงานที่สามารถทดแทนแหล่งพลังงานดั้งเดิมได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษา ค้นคว้า และพัฒนาพลังงานทดแทนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์และมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง

พลังงานจากแสงอาทิตย์

พลังงานจากแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานที่มีปริมาณพลังงานมหาศาล สะอาด และเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ดีที่สุด จึงได้มีการค้นคว้าการนำแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานทดแทน โดยการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกกันว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) เพื่อเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานทดแทนผ่านอุปกรณ์ประดิษฐ์ ซึ่งพลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้ามีค่าเทียบเท่า

กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แก๊สธรรมชาติ อีกทั้งยังมีความสะอาดของแหล่งพลังงานซึ่งเป็นข้อดีที่สำคัญสำหรับพลังงานทดแทน

พลังงานจากแหล่งน้ำ

พลังงานจากแหล่งน้ำถือเป็นอีกพลังงานหนึ่งที่มีปริมาณมาก โดยปริมาณของน้ำบนโลกมีมากถึงร้อยละ 70 เปอร์เซนต์ เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด พลังงานจากแหล่งน้ำยังเป็นพลังงานที่สะอาด แต่สามารถเกิดการเจือปนได้ง่าย การใช้พลังงานจากแหล่งน้ำมีการใช้มากกว่า 100 ปีมาแล้ว เช่น การหมุนกังหันน้ำ เป็นต้น โดยปัจจุบันมีการใช้พลังงานจากการเคลื่อนที่ของน้ำ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนซึ่งสามารถเกิดเป็นพลังงานในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังใช้การเปลี่ยนสถานะ และวัฏจักรของน้ำ เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นๆได้อีกด้วย

พลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานที่ไม่สามารถควบคุมการเกิดได้ และไม่มีปริมาณที่แน่นอนขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศของบริเวณนั้นๆ โดยพลังงานลมเกิดจากความแตกต่างของสองอุณหภูมิ ทำให้เกิดเป็นพลังงานลม พลังงานลมเป็นพลังงานสะอาดและบริสุทธิ์ใช้แล้วไม่มีวันหมดไป ซึ่งการใช้งานจากพลังงานลมจะคล้ายคลึงกับพลังงานจากแหล่งน้ำ โดยอุปกรณ์หลักที่เปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานในรูปแบบอื่น คือ กังหันลม ปัจจุบันการใช้พลังงานลมมีปริมาณที่น้อยเนื่องจากต้นทุนสูงและมีปริมาณที่ไม่แน่นอน จึงไม่ค่อยมีความนิยมกันมากนัก

พลังงานจากชีวมวล

พลังงานจากชีวมวลเป็นพลังงานที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น กะลามะพร้าว กากอ้อย มันสำปะหลัง แกลบ ไม้ไผ่ และเศษเหลือทิ้งจากการเกษตร เป็นต้น โดยพลังงานเหล่านี้จะมีค่าความร้อนในตัวของชีวมวลเองแต่จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล การใช้พลังงานจากชีวมวลนั้นมีมานานหลายร้อยปี โดยการนำชีวมวลมาเผาให้เกิดความอบอุ่นกับร่างกาย ปัจจุบันมีการนำชีวมวลมาเผาเพื่อให้เกิดเป็นพลังงานไฟฟ้า และพบว่ามีการใช้เพิ่มขึ้นในทุกๆปี เนื่องจากสามารถเพาะปลูกทดแทนได้ และพลังงานเชื้อเพลิงจากชีวมวลมีค่าความร้อนที่เหมาะสมการนำไปใช้อีกด้วย

พลังงานจากสาหร่าย

พลังงานจากสาหร่ายถือเป็นพลังงานแหล่งใหม่ที่มีการค้นพบ โดยสาหร่ายมีข้อดีอยู่ด้วยกันหลายอย่าง เช่น มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มีปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 40 ถึง 80 เปอร์เซนต์ ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ปัจจุบันพลังงานจากสาหร่ายที่นำมาใช้ คือ นำมา

ทำเป็นอาหารและส่วนผสมในยารักษาโรคต่างๆ นอกจากนั้นยังมีการนำสาหร่ายมาสกัดเพื่อให้ได้เป็นน้ำมันชีวภาพ ซึ่งน้ำมันชีวภาพที่ได้พบว่ามีค่าความร้อนสูงเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้

2.3 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล [7] คือ สารอินทรีย์ที่มีพลังงานอยู่ในตัวเองตามธรรมชาติ และพลังงานนั้นสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ เช่น กะลามะพร้าว กากอ้อย มันสำปะหลัง แกลบ ไม้ไผ่ และเศษเหลือทิ้งจากการเกษตร เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากชีวมวลให้เกิดเป็นพลังงานนั้นทำได้ง่าย โดยผ่านกระบวนการทางความร้อนหรือกระบวนการทางเคมี อาทิเช่น การเผาไหม้ชีวมวลเพื่อให้เกิดความร้อนและนำไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิล ที่มีอยู่อย่างจำกัด และมีวันหมดไป การนำชีวมวลมาใช้จะช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เราต้องนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเข้ามาในประเทศ เนื่องจากความต้องการใช้ด้านพลังงานในประเทศที่มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งเสริมการมีรายได้ให้กับชุมชนที่มีชีวมวลที่แตกต่างกัน จนกระทั่งลดมลภาวะและสภาวะเรือนกระจกที่เป็นผลมาจากการใช้พลังงานจากแหล่งปิโตรเลียม ทำให้เรามีแนวคิดและความคาดหวังว่าการพัฒนาโครงสร้างเกี่ยวกับการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทดแทน และเสริมสร้างความเข้มแข็งของการมีส่วนร่วมในชุมชนได้อีกด้วย



กะลามะพร้าว



แกลบ



กากอ้อย



เศษไม้ไผ่

รูปที่ 2.3 ชีวมวลที่พบมากในประเทศไทย [7]

2.3.1 ศักยภาพชีวมวล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลผลิตและการใช้ชีวมวล [8] พบว่าการใช้ชีวมวลในประเทศไทยยังมีความต้องการเป็นอย่างมาก เช่น กากอ้อยและแกลบ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้มีความต้องการสูงของโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นชีวมวลที่เหมาะสมแก่การนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในระบบของโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อลดต้นทุนจากการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งมีต้นทุนที่สูงกว่าจึงทำให้มีการต้องมีการนำเข้าหรือ ซื้อ-ขาย เข้ามาจากต่างประเทศ นอกจากนี้ยังมีชีวมวลบางประเภทที่ยังไม่ได้มีการนำไปใช้อย่างเป็นรูปธรรม เช่น ยอดและใบอ้อย ฟางข้าว เหง้ามะพร้าวหลัง ทางใบและก้านใบของปาล์มน้ำมัน เป็นต้น แต่ชีวมวลเหล่านี้สามารถต่อยอดไปเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบอื่นๆ อาทิ เช่น เครื่องหมักสิ่งทอ เฟอร์นิเจอร์ และผลิตภัณฑ์จากงานฝีมือ เป็นต้น

สำหรับศักยภาพชีวมวลของประเทศไทย ส่วนใหญ่เกิดจากผลผลิตทางการเกษตรเทียบกับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นชีวมวล ซึ่งเป็นข้อมูลจากกระทรวงพลังงานในปี พุทธศักราช 2560 โดยจะแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2560 [8]

ชนิด	ผลผลิต (ton)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล (ton)	ค่าความร้อน (MJ/Kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,625.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ใบ	170,383.17	19.44	3,312.25	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11

ชนิด	ผลผลิต (ton)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล (ton)	ค่าความร้อน (MJ/Kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
ปาล์ม น้ำมัน	8,162,379	ทะลาย เปล่า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		ใบ	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
		กะลา	38,959.04	18.46	719.18	17.02
		ก้าน	2,203,740	9.83	21,824.24	516.62
มัน สำปะหลัง	30,088,025	ลำต้น	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628,990.82	15.40	9,686.46	229.30
		กาบ	464,250.95	16.23	7,534.79	178.36
		กะลา	128,936.58	17.93	2,311.83	54.73
ไม้ ยางพารา	3,090,280	กิ่ง/ก้าน	312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
รวม	1458,53,073		59,539,905.20		504,339.40	11,938.67

ประเภทของชีวมวลที่มาจากสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชชั้นนั้น ส่วนใหญ่เป็นพืชผลทางการเกษตรหรือเศษเหลือจากการเพาะปลูก โดยเราสามารถแบ่งประเภทชีวมวลตามแหล่งที่มาเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภทแรก คือ ชีวมวลที่ได้จากโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น

- แกลบที่เหลือทิ้งจากโรงสีข้าว
- ชังข้าวโพดที่เหลือจากไซโลข้าวโพด
- ชานอ้อยที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาลในโรงงานน้ำตาล
- ไม้ไผ่ที่เหลือทิ้งจากการทำเฟอร์นิเจอร์หรือการทำข้าวหลาม

ชีวมวลประเภทแรกเป็นที่ต้องการมากในอุตสาหกรรมทั่วไป เพราะสามารถเก็บรวบรวมได้ง่ายและมีค่าต้นทุนที่ต่ำ เหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ประเภทสอง คือ ชีวมวลที่ได้จากการเพาะปลูกตามไร่ สวน และนาข้าว เช่น

- ฟางข้าวที่ได้จากการทำนาข้าว
- ชังข้าวโพดที่เหลือจากการเก็บเกี่ยว
- เหง้ามะพร้าวที่ได้จากการทำไร่มันสำปะหลัง
- ใบและทางใบปาล์มน้ำมันที่ได้จากการทำสวนปาล์มน้ำมัน

ชีวมวลประเภทสองเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมทั่วไปเหมือนกับชีวมวลประเภทที่หนึ่ง แต่จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในส่วนของการจัดเก็บและขนส่ง จึงทำให้ต้นทุนมีค่าสูงกว่าชีวมวลประเภทหนึ่ง จึงเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ให้มูลค่าสูงกว่าเป็นพลังงานเชื้อเพลิง

ประเภทสาม คือ ชีวมวลที่ถูกเพาะเลี้ยงขึ้นเพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะ เช่น

- การเพาะเลี้ยงสาหร่าย

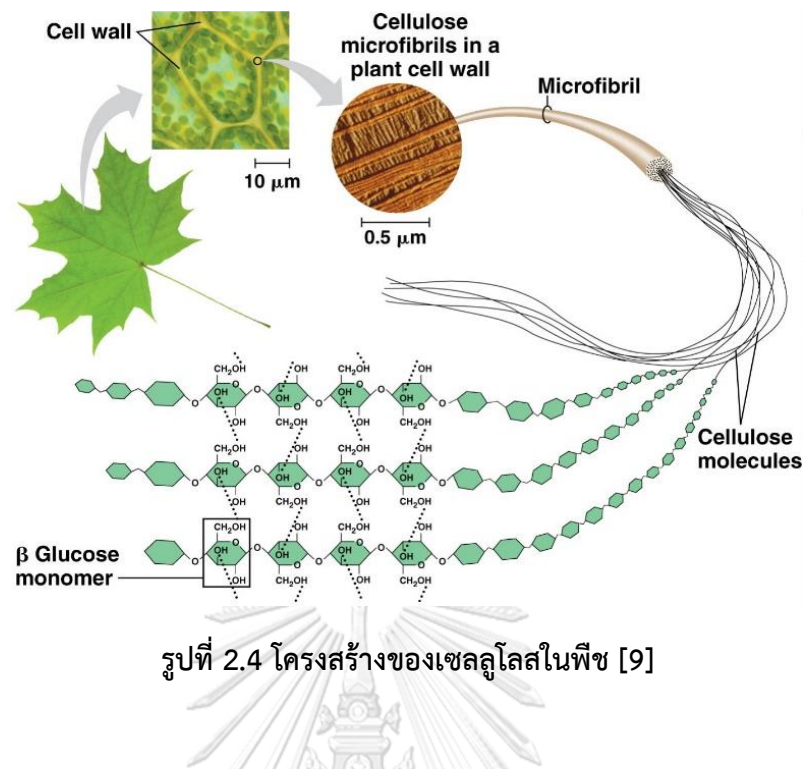
พบว่าชีวมวลประเภทสามมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและเติบโตได้ทุกสภาวะ เพื่อนำชีวมวลมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเป็นหลัก จึงทำให้ชีวมวลประเภทสามมีความน่าสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองในด้านพลังงานทดแทน

2.4 องค์ประกอบของชีวมวล

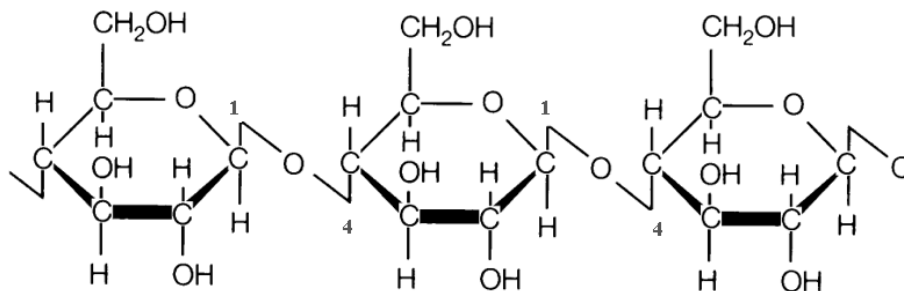
โดยองค์ประกอบทั่วไปของชีวมวลจะประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และโปรตีนเป็นหลัก โดยปริมาณขององค์ประกอบจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและแหล่งที่มาของชีวมวล

2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส [9] เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหรือสารอินทรีย์ที่พบมากในธรรมชาติ มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยเซลลูโลสหรือพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) เกิดจากการมีดีกลูโคสเชื่อมโยงกันด้วยพันธะปีตักกูลโคซิดิกที่มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ เมื่อ n คือ ระดับของพอลิเมอร์ไซชัน ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของเซลลูโลส และเมื่อเซลลูโลสเชื่อมกัน เรียกว่า ไมโครไฟบริล (Micro fibril) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง



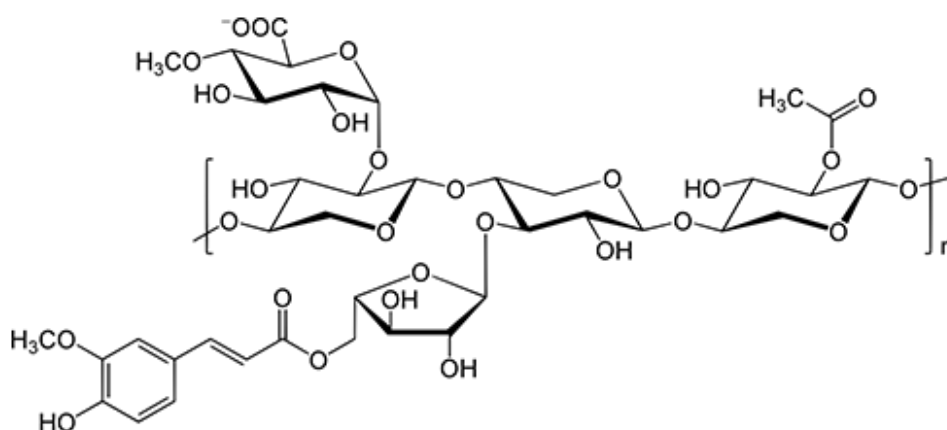
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเซลลูโลสในพืช [9]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส [9]

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

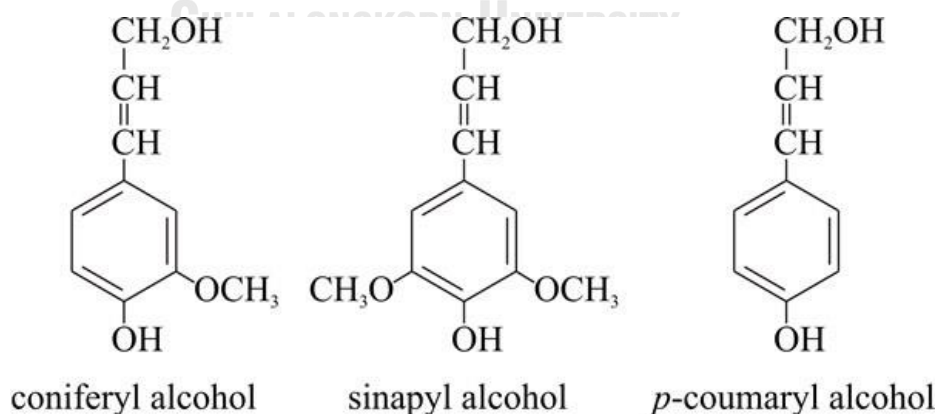
เฮมิเซลลูโลส [10] เป็นสารอินทรีย์ที่พบมากเป็นอันดับสองในพืชรองจากเซลลูโลส โดยเฮมิเซลลูโลสจะเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ซึ่งส่วนมากเป็นดีไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (Xylose) ด้วยมีสูตรโมเลกุลอย่างง่าย คือ $(C_5H_8O_4)_n$ แต่พบว่ามีความซับซ้อนของพอลิเมอร์ไซชันที่ต่ำกว่าเซลลูโลส จึงทำให้เกิดการสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลส และละลายน้ำได้ดีกว่าเซลลูโลสอีกด้วย นอกจากนี้สามารถย่อยด้วยสารละลายกรดเจือจางและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น โดยเฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200-260 องศาเซลเซียส ทำให้เป็นสารระเหยได้มากกว่า และมีการเกิดชาร์และทาร์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการสลายตัวของเซลลูโลส



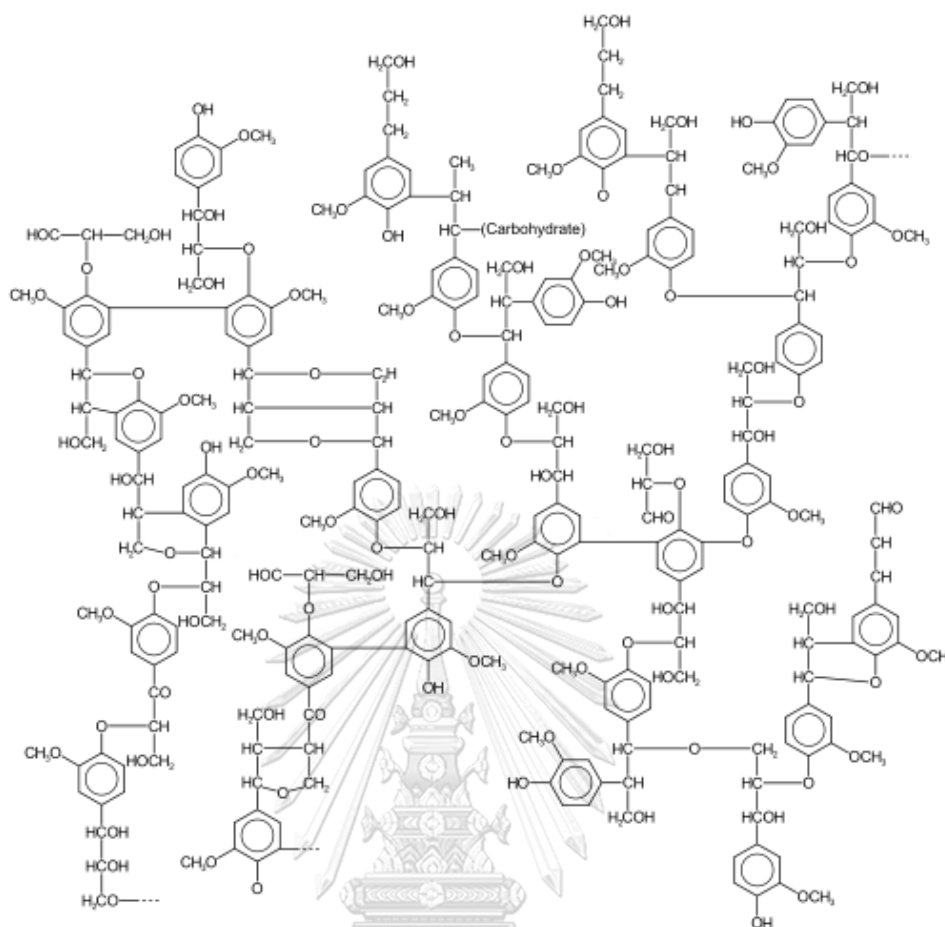
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [10]

2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน [11] เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่และเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างไม่แน่นอน โดยลิกนินจะประกอบไปด้วยอนุพันธ์ของฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) เชื่อมกันเป็นโครงสร้างแบบสามมิติ แต่มีมอนอเมอร์ที่สามารถแบ่งหน่วยย่อยของลิกนินได้ 3 ชนิด ได้แก่ *p*-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol และ sinapyl alcohol โดยลิกนินทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง นอกจากนี้การสลายตัวทางความร้อนของลิกนินด้วยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิประมาณ 280-500 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกฟีนอลเป็นหลัก



รูปที่ 2.7 มอนอเมอร์ย่อยของลิกนิน [11]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของลิกนิน [11]

2.4.4 โปรตีน (Protein)

โปรตีน [12] เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยกรดอะมิโน (Amino) หลายชนิดถูกพอลิเมอไรซ์เข้าด้วยกัน ทำให้มีสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนที่อยู่ภายในโครงสร้าง โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของชีวมวลทั่วไป แต่จะพบในชีวมวลบางประเภท เช่น สาหร่าย เป็นต้น

2.5 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวล [13] จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ความชื้น ส่วนที่เกิดการเผาไหม้ และส่วนที่ไม่เกิดการเผาไหม้ เป็นต้น โดยองค์ประกอบของชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้นถือเป็นส่วนที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น รวมถึงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ตามมาอีกด้วย ซึ่งชีวมวลแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบที่แตกต่างกันทำให้เกิดสมบัติที่แตกต่างกัน

2.5.1 ความชื้น (Moisture)

ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ภายในโครงสร้างของชีวมวล โดยปกติแล้วความชื้นหรือน้ำจะเป็นองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิต ซึ่งในชีวมวลจะมีปริมาณที่สูง ถ้าต้องการนำชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงานจึงควรทำให้ชีวมวลมีค่าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชีวมวล

2.5.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

ในส่วนที่เผาไหม้ได้สามารถแบ่งได้อีก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นสารระเหย (Volatiles matter) และส่วนคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ซึ่งทั้งสองส่วนสามารถเกิดการลุกไหม้ได้ โดยส่วนของสารระเหย คือ ส่วนที่เกิดการระเหยเมื่อมีความร้อนเกิดขึ้น และส่วนของคาร์บอนคงตัว คือ ส่วนที่คาร์บอนหลงเหลืออยู่

2.5.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือเถ้า (Ash)

ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือเถ้า คือ ส่วนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ เมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยสัดส่วนขององค์ประกอบขึ้นอยู่กับชนิดชีวมวล โดยมหาสารรายจะมีปริมาณของเถ้าสูงเนื่องจากมหาสารรายเกิดการดูดซับแก๊สและของเสียในน้ำ จึงทำให้เกิดเป็นสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งส่วนใหญ่เถ้าของชีวมวลจะมีอยู่ประมาณ 1 ส่วน 3 ของน้ำหนักชีวมวล

2.6 พลังงานที่ได้จากชีวมวล

พลังงานที่ได้จากชีวมวล [13] แต่ละชนิดจะมีให้พลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้น โดยค่าความร้อนของชีวมวลนั้นถือเป็นค่าที่สำคัญที่บ่งบอกพลังงานที่จะได้รับและความสามารถในการนำไปใช้ที่เหมาะสมกับค่าความร้อนที่เกิดขึ้น โดยค่าความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) เป็นค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล โดยมีการหักค่าพลังงานส่วนหนึ่งที่ใช้สำหรับการระเหยของน้ำที่อยู่สะสมภายในชีวมวลระหว่างการเผาไหม้ หน่วยของค่าความร้อนจะอยู่ในหน่วย กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg) หรือ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (kcal/kg)

ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) เป็นค่าความร้อนทั้งหมดที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งรวมกับค่าการระเหยของน้ำ โดยหน่วยของค่าความร้อนสูงจะคล้ายกับหน่วยของค่าความร้อนต่ำ นอกจากนี้การแสดงผลจะนิยมในการแสดงผลในรูปของค่าความร้อนสูง

โดยตารางที่ 2.2 จะแสดงองค์ประกอบของชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย ความชื้น ชี้เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว นอกจากนี้แสดงค่าความร้อนสูงโดยประมาณของชีวมวล เช่น แกลบ ฟางข้าว กะลาปาล์ม ชังข้าวโพด ทะลายปาล์มและชานอ้อย เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 ค่าความร้อนของชีวมวล [13]

ชีวมวล	องค์ประกอบของชีวมวล				ค่าความร้อนสูง (กิโลจูลต่อ กิโลกรัม)
	ความชื้น (โดยน้ำหนัก)	ชี้เถ้า (โดยน้ำหนัก)	สารระเหย (โดยน้ำหนัก)	คาร์บอนคง ตัว (โดยน้ำหนัก)	
แกลบ	12	12.65	56.5	18.9	14,755
ฟางข้าว	10	10.39	60.7	18.9	13,650
กะลาปาล์ม	12	3.50	68.2	16.3	18,267
ไม้ยางพารา	45	1.59	45.7	7.71	10,365
ชังข้าวโพด	40	0.90	45.4	13.7	11,298
ทะลายปาล์ม	58	2.03	30.5	8.9	9,196
ต้นปาล์ม	48	1.20	38.7	11.7	9,370
ทางปาล์ม	78	0.70	16.3	4.6	3,908
กะลาปาล์ม	12	3.50	68.2	16.3	18,267
เส้นใยปาล์ม	38	4.42	42.6	14.4	13,127
ชานอ้อย	51	1.43	41.9	5.9	9,243
ใบอ้อย	9	6.10	67.8	16.9	16,794

2.7 ข้อดีและข้อเสียของพลังงานชีวมวล

ข้อดีของพลังงานชีวมวล

- ในกระบวนการเผาไหม้ชีวมวลนั้นจะก่อให้เกิดมลพิษน้อยกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินที่มาจากแหล่งฟอสซิล
- การย่อยสลายตัวธรรมชาติของชีวมวล จะทำให้เกิดแก๊สมีเทนเกิดขึ้นในปริมาณมาก การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์จึงถือเป็นการลดปล่อยแก๊สมีเทน

- องค์ประกอบของชีวมวลมีปริมาณซัลเฟอร์หรือกำมะถันในสัดส่วนที่น้อย เมื่อเทียบกับถ่านหิน ดังนั้นเมื่อการนำชีวมวลมาแปรรูปด้วยวิธีการเผาไหม้นั้นจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมในปัญหาเรื่องฝนกรดน้อยกว่าการใช้ถ่านหิน
- ชีวแก๊สจากชีวมวลมีสภาพเป็นเบส จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูกหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรดได้
- ลดการนำพลังงานจากต่างประเทศ ส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนในประเทศและทำให้ประชากรในประเทศมีรายได้เพิ่มขึ้น
- ชีวมวลสามารถแปรรูปได้หลากหลายพลังงานและผลิตภัณฑ์

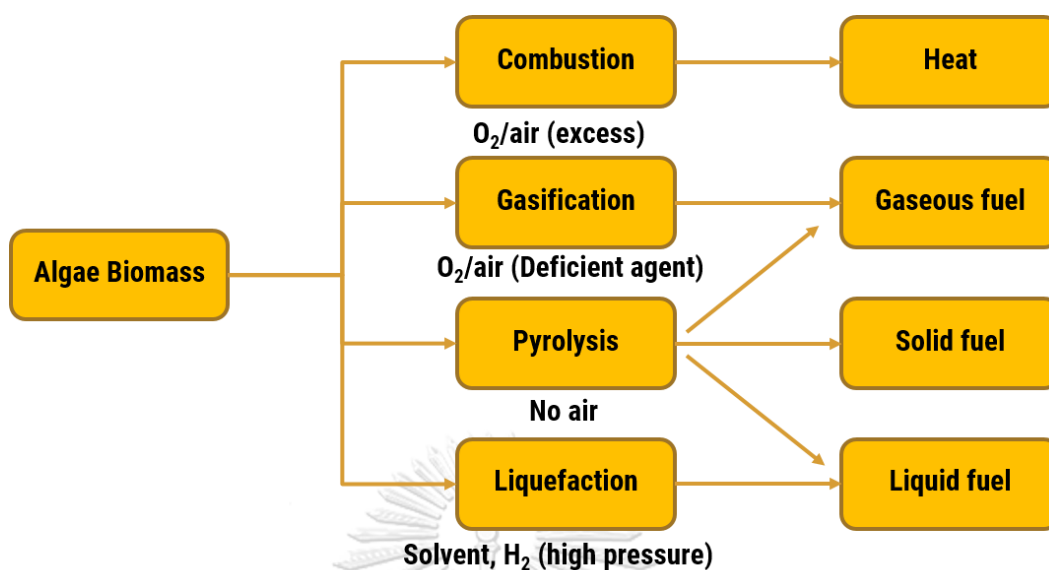
ข้อเสียของพลังงานชีวมวล

- ชีวมวลมีน้ำหนักที่ไม่สม่ำเสมอและมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ส่วนใหญ่มีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กยากต่อการขนส่ง
- ชีวมวลส่วนใหญ่มีค่าความชื้นที่สูง จึงต้องมีกระบวนการที่ลดปริมาณความชื้นของชีวมวลก่อนจะเข้าสู่ระบบผลิตพลังงานจากชีวมวล จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการทำให้ความชื้นออกไปหรือมีค่าต่ำที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้
- ชีวมวลส่วนใหญ่เป็นธาตุผสมระหว่างโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งมีความสามารถในกักคาร์บอนได้

2.8 การแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง

โดยการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นรูปของพลังงานนั้น [2, 14] มีอยู่ด้วยกันหลัก 2 วิธีการ ได้แก่ วิธีการเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) และวิธีการเชิงเคมีชีวภาพ (Biochemical conversion) โดยทั้งสองวิธีการนี้จะให้พลังงานที่แตกต่างกัน แต่ละวิธีการจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการเชิงเคมีความร้อน เนื่องจากง่ายต่อการวิจัย ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าวิธีการเชิงเคมีชีวภาพ โดยวิธีการเชิงเคมีความร้อนสามารถแบ่งได้อีก 4 ประเภทใหญ่ ได้แก่

1. การเผาไหม้โดยตรง (Direct-Fired, Combustion)
2. ลิควิแฟกชัน (Liquefaction)
3. แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)
4. ไพโรไลซิส (Pyrolysis)



รูปที่ 2.9 กระบวนการแปรรูปเชิงเคมีความร้อน [14]

2.8.1 การเผาไหม้ (Direct-Fired, Combustion)

การเผาไหม้ [2, 14] เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดจากการร่วมกันของความร้อนและแสง เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาก่อนจะทำการเผาไหม้จำเป็นต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ออกซิเจนหรืออากาศ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าหากมีอากาศในปริมาณมากเกินไปจะทำให้การเผาไหม้มีค่าต่ำลง ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ต่ำลงเช่นเดียวกัน

โดยรูปแบบการเผาไหม้ของชีวมวลที่เป็นของแข็งนั้นสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

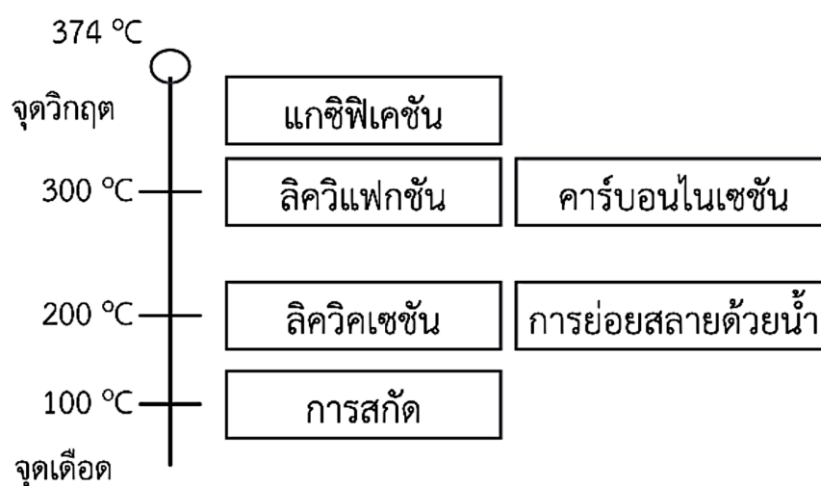
1. การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) ชีวมวลที่เกิดการเผาไหม้จะมีโมเลกุลขนาดเล็กและสามารถเกิดการระเหยได้เมื่อมีการให้ความร้อน โดยเมื่อมีการให้ความร้อนเกิดขึ้นชีวมวลจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในระบบ เกิดเป็นเชื้อเพลิงที่ระเหยได้และเกิดการเผาไหม้
2. การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (Decomposition combustion) เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการสลายตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยแก๊สที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวจะมีความร้อนซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นเปลวไฟและเกิดการเผาไหม้
3. การเผาไหม้ที่พื้นผิว (Surface combustion) เป็นการเผาไหม้ของสารองค์ประกอบคาร์บอนที่สามารถระเหยได้โดยเกิดการสะสมกันอยู่บริเวณพื้นผิว อาทิเช่น ถ่านหิน เป็นต้น ออกซิเจนหรือไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ จะเกิดการแพร่เข้าไปในรูพรุนที่มีอยู่ภายในหรือพื้นผิวของของแข็ง และเกิดเผาไหม้เมื่อมีการให้ความร้อนโดยปฏิกิริยาจะเกิดบริเวณพื้นผิว

4. การเผาไหม้แบบช้าๆที่ไม่มีไฟแต่มีควัน (Smoldering combustion) เป็นการสลายตัวด้วยความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ชีวมวลจุดติดหรือลุกติดไฟ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบช้าๆและไม่มีไฟ

รูปแบบการเผาไหม้ของชีวมวลในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ เป็นการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัวและการเผาไหม้ที่พื้นผิว โดยในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้วิธีการป้อนออกซิเจนเข้าไปในระบบให้เหมาะสมไม่มากหรือน้อยเกินไป เพื่อลดต้นทุน รวมไปถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้มีค่าสูงสุด

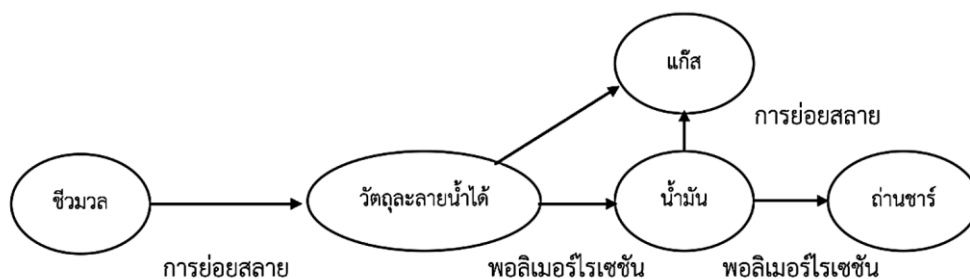
2.8.2 ลิควิแฟกชัน (Liquefaction)

ลิควิแฟกชัน [2, 14] คือ การเผาไหม้ที่อยู่ภาวะอับอากาศ (ไพโรไลซิส) ในน้ำที่มีความดันสูงประมาณ 10 เมกกะปาสคาลและอุณหภูมิประมาณ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ชีวมวลนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นรูปผลิตภัณฑ์แก๊ส ของเหลวและของแข็ง ซึ่งคล้ายกับกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสแก๊ส นอกจากนี้ ลิควิแฟกชันที่ทำปฏิกิริยาในน้ำ วัตถุประสงค์ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอบแห้งก็สามารถทำปฏิกิริยาลิควิแฟกชันได้เลย ซึ่งเหมาะสมกับชีวมวลที่มีองค์ประกอบของความชื้นที่สูง เช่น ชีวมวลจากแหล่งน้ำ ขยะ และกากอินทรีย์อื่นๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่อุณหภูมิสูง [14]

โดยลิควิแฟกชันเป็นปฏิกิริยาไพโรไลซิสในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิ จึงมีการเกิดการสลายตัวและเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน แสดงดังรูปที่ 2.11 คล้ายคลึงกับการเกิดไพโรไลซิส



รูปที่ 2.11 แผนผังการเกิดปฏิกิริยาลิวแฟกชัน [14]

2.8.3 แกซิฟิเคชัน (Gasification)

แกซิฟิเคชัน [2, 14] เป็นกระบวนการชีวมวลที่เป็นของแข็งให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สหรือเชื้อเพลิงแก๊ส (Gasification) โดยให้ความร้อนสูงถึง 700 องศาเซลเซียส ผ่านสารตัวกลาง (Gasifier agent) เช่น อากาศ ละอองน้ำหรือออกซิเจนที่มีจำนวนจำกัด ซึ่งกระบวนการแกซิฟิเคชันมีความแตกต่างจากกระบวนการเผาไหม้ เนื่องจากการเผาไหม้เป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่กระบวนการเท่านั้น แต่การเกิดแกซิฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนรูปเคมีภายในของชีวมวลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถเกิดการเผาไหม้ได้ (Combustible Gas) โดยอาศัย 2 กระบวนการซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สส่วนใหญ่ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) ซึ่งเป็นแก๊สที่มีคุณภาพและง่ายต่อการใช้งาน รวมไปถึงเป็นสารตั้งต้นหลักในการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ

โดยในการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันนั้นจะเกิดปฏิกิริยาอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย จึงต้องทำการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ รวมถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เหมาะสมตามความต้องการใช้ ซึ่งเราสามารถแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคร่าวๆได้ดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction)



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นข้างต้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้อยู่ระหว่าง 1000 ถึง 1500 องศาเซลเซียส โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาจะถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาในส่วนอื่นภายในระบบ

2. ปฏิกิริยาบูดูอาร์ต (Boudouard Reaction)



3. ปฏิกิริยาแก๊สน้ำ (Water gas Reaction)



ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งมีจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส โดยแก๊สบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับถ่านชาร์ที่ร้อนเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น

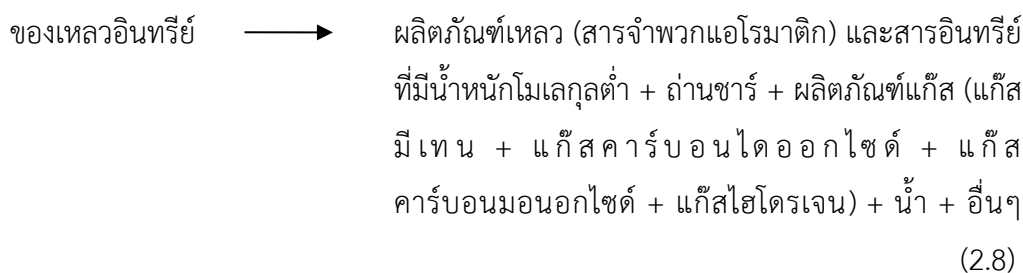
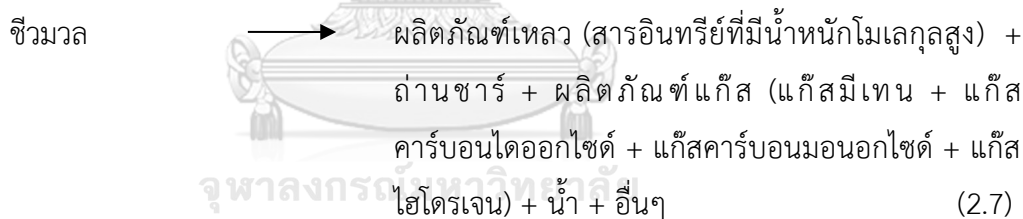
4. ปฏิกิริยาชิฟต์ (Water gas shift reaction)

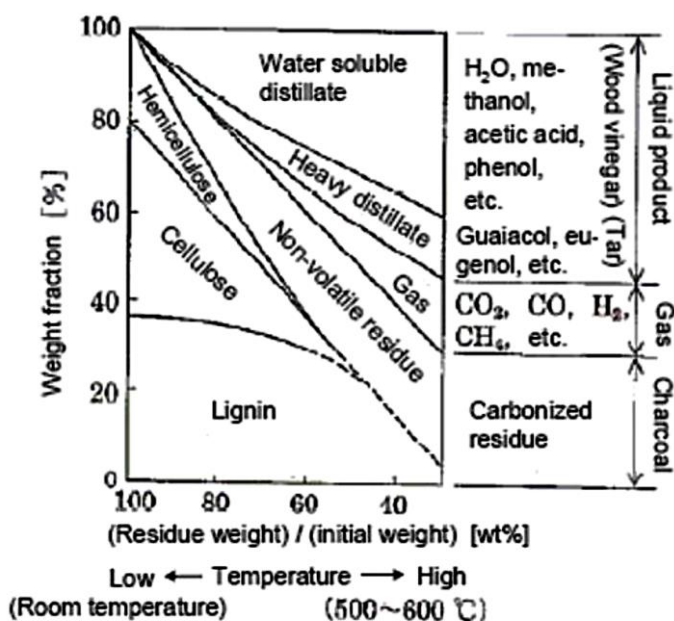


ปฏิกิริยาชิฟต์เป็นกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น ส่งผลให้ได้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

2.8.4 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส [2, 14] เป็นกระบวนการเผาไหม้ชีวมวลที่อยู่ในภาวะอับอากาศหรือไม่มีออกซิเจนในระบบ โดยชีวมวลส่วนใหญ่จะมีประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นหลัก โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการทำไพโรไลซิสชีวมวล ได้แก่ ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ของแข็งหรือถ่านชาร์ (Char) และผลิตภัณฑ์แก๊ส (Pyro-gas) ซึ่งปฏิกิริยาที่จะเกิดจะแสดงดังสมการต่อไปนี้





รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างกระบวนการเกิดไพโรไลซิส [2]

2.8.5 ประเภทของไพโรไลซิส

เราสามารถแบ่งประเภทของไพโรไลซิสตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้การไพโรไลซิสเป็น 5 ประเภท [14]

1. ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) หรืออาจเรียกว่า คาร์บอนเซชัน เป็นการควบคุมอุณหภูมิให้มีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในภาวะอับอากาศ โดยมีอุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้ คือ ถ่านชาร์เป็นหลัก
2. ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) เป็นไพโรไลซิสที่มีการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เกิดการแตกตัวเป็นสารระเหยและเกิดการควบแน่นกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวเป็นหลัก
3. แฟลชไพโรไลซิส (Flash pyrolysis) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่คล้ายกับการไพโรไลซิสแบบเร็ว แต่ระยะเวลาที่อยู่เครื่องปฏิกรณ์จะสั้นกว่า เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สูง ละมีย้อยละของแข็งและแก๊สในปริมาณต่ำ
4. ไฮโดรไพโรไลซิส (Hydro pyrolysis) เป็นการให้ความร้อนในบรรยากาศของไฮโดรเจน โดยทำการอัดความดันเข้าไปและอุณหภูมิที่ใช้ไม่เกินช่วงของแก๊สฟิเคชัน การทำแบบนี้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวสูง และมีความเสถียร แต่การทำกระบวนการนี้เกิดการสิ้นเปลือง เพราะต้องใช้พลังงานในการอัดความดันให้อยู่ในภาวะไฮโดรเจน

5. ไฮโดรไลซิส (Hydrous pyrolysis) เป็นการสลายตัวด้วยตัวกลางเป็นน้ำร้อนที่มีการอัดความดัน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) พร้อมกับการสลายตัวด้วยความร้อน โดยการทำกระบวนการนี้มักใช้กับชีวมวลที่มีความชื้นหรือออกซิเจนในปริมาณที่สูง เนื่องจากออกซิเจนจากโมเลกุลของน้ำสามารถร่วมทำปฏิกิริยาการสลายตัวได้ด้วย

ตารางที่ 2.3 ประเภทของไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน [14]

กระบวนการ	เวลาของปฏิกิริยา (Residence time)	อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)	อุณหภูมิปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์หลัก
ไพโรไลซิสแบบช้า	24 ชั่วโมง 5 ถึง 30 นาที	ช้ามาก (<1 K/s) ช้า (1 K/s)	ประมาณ 400 ถึง 600	ถ่านชาร์ น้ำมัน และแก๊ส
ไพโรไลซิสแบบเร็ว	< 2 วินาที	เร็ว (>500 K/s)	ประมาณ 500	น้ำมัน
แฟลชไพโรไลซิส	< 1 วินาที	เร็ว (>10 ⁵ K/s)	< 650	น้ำมันและแก๊ส
ไฮโดรไพโรไลซิส	< 10 วินาที	เร็ว	ไม่เกิน 500	น้ำมัน
ไฮดรัลไพโรไลซิส	5-30 นาที	ปานกลาง	ไม่เกิน 400	น้ำมัน

2.8.6 ตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสส่วนใหญ่คำนึงถึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหย และการกระจายตัวของชีวมวลเป็นหลัก ดังนั้นภาวะในการไพโรไลซิส ถือเป็นตัวสำคัญที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยตัวแปรพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน และตัวแปรอื่นๆ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส (Temperature)

อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส [15] ถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้บ่งบอกผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส โดยเราสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งที่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงประมาณ 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของความชื้นส่วนใหญ่ที่อยู่ภายในโครงสร้างของชีวมวล ส่วนที่สองอุณหภูมิอยู่ในช่วง 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยเป็นการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบหลักที่อยู่ในชีวมวลนั้นๆ เพื่อเกิดเป็นสารระเหยและสามารถเกิดการควบแน่นกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ และส่วนที่สามจะมีช่วงอุณหภูมิอยู่ที่ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลที่หลงเหลืออยู่ ซึ่งจะมีส่วนที่ไม่เกิดการสลายตัวทางความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งคือ ถ่านชาร์และขี้เถ้า โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสที่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ถือเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับชีวมวล โดยจะให้ร้อยละของสารระเหยสูงถึง 75 เปอร์เซ็นต์

อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

อัตราการให้ความร้อน [16, 17] ถือเป็นตัวแปรอีกหนึ่งตัวที่มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการควบแน่นของสารระเหยชีวมวล โดยอัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์เป็นหลัก ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูง และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ต่ำ ในกระบวนการไพโรไลซิสที่มีอัตราการให้ความร้อนสูง จะทำให้เกิดการแตกตัวของชีวมวลได้รวดเร็วเนื่องจากความร้อนที่เข้าไปสัมผัสกับชีวมวลมีปริมาณมากและมีระยะเวลาที่เหมาะสมแก่การผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เหลว แต่ถ้าสูงเกินไปจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สแทน โดยการปรับอัตราการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการ ว่าอยากได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเป็นหลักหรือผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นหลัก

ขนาดของอนุภาค (Particle size)

จากการศึกษาผลของขนาดของอนุภาค [18, 19] พบว่าขนาดของอนุภาคส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) โดยแปรผกผันกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย กล่าวได้ว่าเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่การถ่ายโอนความร้อนจะต่ำ เนื่องจากขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวที่ (Surface area) ทำให้ความร้อนต้องมีความสามารถในการแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อของชีวมวลเพื่อเกิดการสลายตัวได้ยาก ในทางกลับกันเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กการถ่ายโอนความร้อนจะสูง แต่เมื่อมีขนาดเล็กมากเกินไปจะทำให้เกิดผลของการสลายของขั้นทุติยภูมิ (Secondary Decomposition) ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นหลัก

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Residence time)

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน [20] มีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ กล่าวได้ว่าเมื่อชีวมวลสัมผัสกับความร้อนมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นกับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ง่าย แต่เมื่อเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนน้อย ทำให้ความร้อนเกิดการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้เหลือปริมาณชีวมวลมากส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งเป็นหลัก

อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas)

อัตราการไหลของแก๊สตัวพา [21] ถือเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากแก๊สตัวพาถือเป็นแก๊สที่พาสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังชุดควบแน่นและกลั่นตัวกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ง่าย กล่าวคือที่มีอัตราการไหลของแก๊สตัวพาสูงจะทำให้เกิดการพาของสารระเหยได้ดี ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณมาก ต่างจากอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ต่ำจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณน้อย

2.8.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

โดยเราสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ และผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ [16] จะมีองค์ประกอบทางเคมี คือคาร์บอนเป็นหลักในปริมาณที่สูง สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการใดๆอีก แต่ส่วนใหญ่จะทำการผ่านกระบวนการเล็กน้อยเพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ของแข็งให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น อาทิเช่น การกระตุ้นถ่านด้วยวิธีการเผาทำให้เกิดเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีคุณสมบัติดับกลิ่น หรือนำไปเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนได้ อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเจือปนของสารประกอบไนโตรเจนหรือกำมะถันในปริมาณน้อย เมื่อทำการเผาไหม้จึงส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยอีกด้วย

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ [22] จะมีองค์ประกอบ 2 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ ส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ และส่วนที่เป็นน้ำมันชีวภาพหรือสารที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ โดยส่วนที่เป็นน้ำมันชีวภาพจะมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น แต่เราสามารถแบ่งไฮโดรคาร์บอนตามช่วงอะตอมได้ดังต่อไปนี้

- น้ำมันเบา (Light oil) ช่วงอุณหภูมิ น้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซิน เป็นต้น
- น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล เป็นต้น
- น้ำมันหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ แนพทาลิน เป็นต้น
- น้ำมันแอนทาซีน (Anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน เป็นต้น
- พิตช์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิ มากกว่า 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (Red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะเป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์จะประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนียเป็นหลัก ส่วนแก๊สอนินทรีย์จะประกอบด้วย มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นหลัก ซึ่งแก๊สที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานในรูปแบบของพลังงานเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเบื้องต้นได้อีกด้วย

2.9 น้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน โดยโครงสร้างที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของชนิด แหล่งที่มา และวิธีการเปลี่ยนจากชีวมวลให้กลายเป็นน้ำมันชีวภาพ

2.9.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) [2] เป็นของเหลวสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม มีสารประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในปริมาณมาก หรือที่เราเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า น้ำมันไพโรไลซิส โดยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohols), อัลดีไฮด์ (Aldehydes), แอนไฮโดรซูการ์ (Anhydrosugars), ฟูแรน (Furans), คีโตน (Ketones) และกรดอะซิติก (Acetic acid) เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้เกิดจากการไพโรไลซิสชีวมวล เมื่อเกิดการสลายพันธะของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิสูงจะได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและผ่านการควบแน่นกลับมาอยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็น

ของเหลว ซึ่งเป็นน้ำมันเบา (Light oil) และน้ำมันหนัก (Heavy oil) โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมระหว่างสารอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้ที่มีร้อยละอยู่ที่ 75-80 เปอร์เซ็นต์ และอีกร้อยละ 20-25 เปอร์เซ็นต์ เป็นน้ำ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ [23]

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยมวล
น้ำ	20-30
คาร์บอน	44-47
ไฮโดรเจน	6-7
ออกซิเจน	46-48
ไนโตรเจน	0-0.2
กำมะถัน	< 0.01
เศษเถ้า	0.1

2.9.2 สมบัติของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ในน้ำ เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน แต่จะไม่สามารถละลายได้ในน้ำมันไฮโดรคาร์บอน โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีที่ต้องการปรับปรุงและพัฒนา น้ำมันชีวภาพก่อน จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้จะแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันชีวภาพ [23]

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ
ความชื้น	15-30
ค่ากรดเบส	2.5
ความถ่วงจำเพาะ	1.2
คาร์บอน	54-58
ไฮโดรเจน	5.5-7.0
ออกซิเจน	35-40
ไนโตรเจน	0-0.2
เถ้า	0-0.2

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ
ค่าความร้อน	16-19
ความหนืด	40-100
ของแข็ง	0.2-1
กากของแข็งจากการกลั่น	มากกว่า 50

2.9.3 การใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพ

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าการใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพนั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงหรือพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีขึ้นก่อนนำไปใช้ โดยปัจจุบันการพัฒนาน้ำมันชีวภาพนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการใช้ในด้านพลังงานทดแทน โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดลงไปเพื่อลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส

โดยการผลิตน้ำมันชีวภาพและแก๊สสังเคราะห์ชีวมวลนั้น สามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสะอาดได้ เมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลแข็งและการใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊ส พบว่าหากต้องการผลิตแก๊สในปริมาณมากจำเป็นต้องใช้ชีวมวลสูง ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาของเถ้าที่สูงตาม แต่เมื่อใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารตั้งต้นแทนจะทำให้ได้ปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณลดน้อยลง นอกจากนี้ยังมีปัญหาในด้านการขนส่งพบว่าเมื่อใช้ชีวมวลเป็นสารตั้งต้นต้องใช้เวลาในการส่งที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในปริมาณอัตราส่วนเท่าๆกัน จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการขนส่งได้นั่นเอง

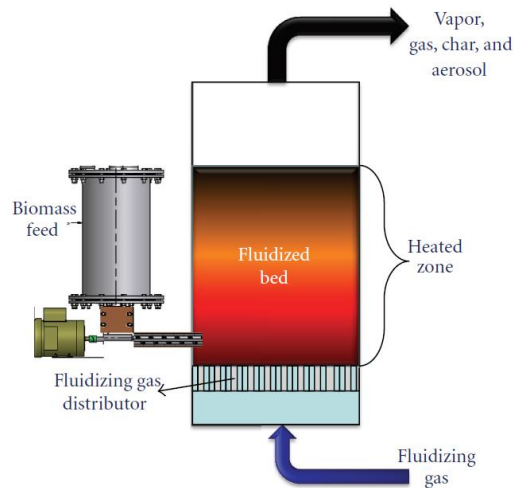
2.10 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กระบวนการเชิงเคมีความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์ซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์ซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) และเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor)

2.10.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์ซ์เบดแบบฟองอากาศ

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์ซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำการป้อนอากาศจากส่วนล่างขึ้นบน ซึ่งแรงดันของอากาศจะทำการพาอนุภาค

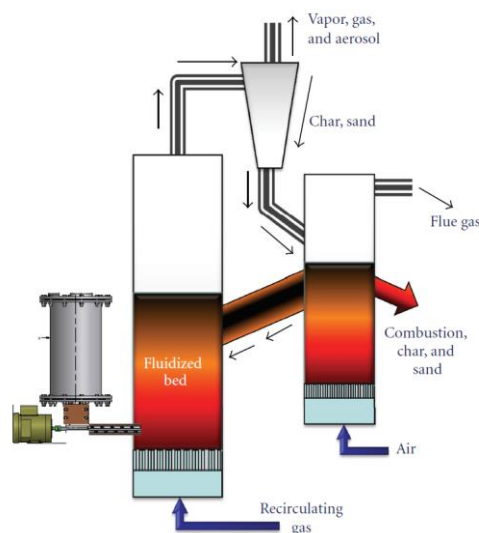
เกิดการลอยตัวและหมุนในเครื่องปฏิกรณ์อย่างมีสมดุลและสม่ำเสมอ และมีอีกส่วนหนึ่งเกิดการรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟอง แล้วเกิดการแตกตัวบริเวณผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด เมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นชีวมวลจะเกิดการลอยตามขึ้นผสมกัน โดยแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบฟองอากาศ [1]

2.10.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน

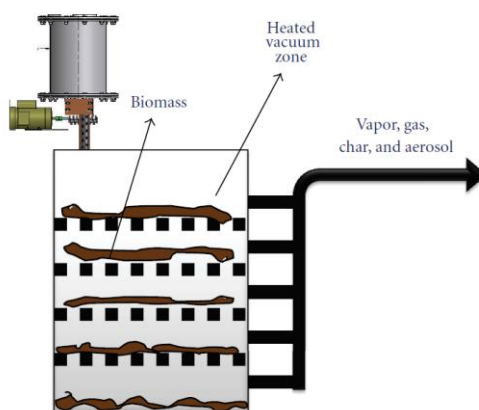
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคแขวนลอยตัวหมุนวนเวียนอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์ที่มีกระแสสูงและจะมีกระแสสูงขึ้นเรื่อยๆจนเกิดส่วนที่หลุดออกไป โดยส่วนที่หลุดออกไปจะเกิดการหมุนเวียนกลับมาใหม่ด้วยไซโคลน โดยแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน [1]

2.10.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ

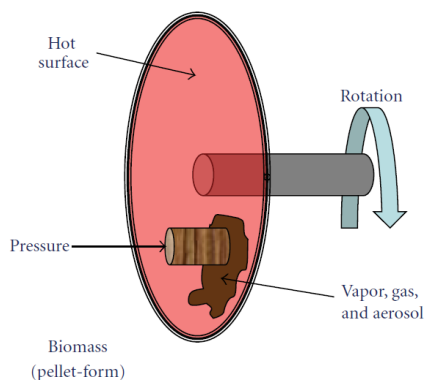
เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบให้มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้สลายตัวของชีวมวลหรือการเผาไหม้ ภายใต้ภาวะความดันต่ำและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์ที่ยาวนาน ซึ่งต่างจากการทำไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) โดยแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ [1]

2.10.4 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ

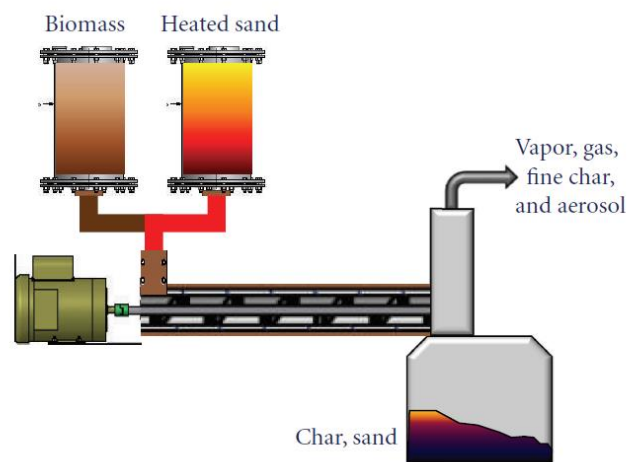
เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่ชีวมวลเกิดการเคลื่อนไปชนกับของแข็งที่เป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดความร้อน ซึ่งจุดเด่นของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ คือ การใช้ความดันสูงในขนาดการป้อนชีวมวลทำให้เกิดการเชื่อมชีวมวลกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส จึงทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี โดยแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ [1]

2.10.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู

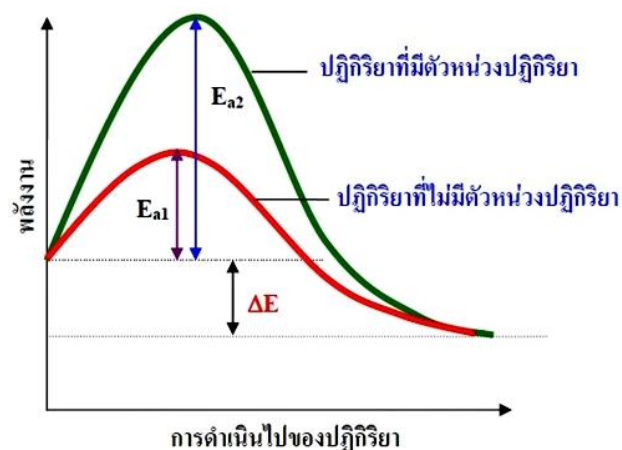
เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีแก๊สตัวพาและใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำงานอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูจะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู [1]

2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา [24, 25] คือสารที่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น โดยไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตั้งต้นที่ใส่เข้าไป แต่จะช่วยส่งเสริมให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นหรือเฉพาะเจาะจงยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา [24]

2.11.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts)

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่สถานะเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งของแข็งหรือของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งแน่นอนเพื่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจนและรวดเร็ว รวมไปถึงง่ายต่อการศึกษา เนื่องจากการวิเคราะห์สารในกระบวนการต่างๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายทำได้ง่ายด้วยใช้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และการหาอัตราของการเกิดปฏิกิริยาก็ทำได้ง่ายเช่นกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางและเป็นที่สนใจในวงกว้าง เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์มีความสามารถในการเลือกทำสูง (Selectivity) และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่เป็นการคายความร้อน แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์คือเกิดการสลายตัวหรือเสื่อมสภาพได้ง่ายในภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูง รวมไปถึงการแยกผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยานั้นทำได้ยาก

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่สถานะแตกต่างกับสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ เช่น สารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะตั้งเป็นของเหลวหรือแก๊ส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์นิยมใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมจำพวก ยา เชื้อเพลิง ตัวทำละลาย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์เป็นของแข็งมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี ทนทานต่ออุณหภูมิและความดันสูง และยังสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้นได้ง่าย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ส่วนที่ทำให้เกิดการว่องไวของปฏิกิริยา (Active component) และส่วนที่สองคือตัวรองรับ (Support) หรือตัวพา (Carrier) มักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เพื่อง่ายต่อการกระจายตัวของส่วนที่ทำให้เกิดการว่องไว แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะมีเพียงส่วนที่ทำให้เกิดการว่องไวของปฏิกิริยา

2.12 โดโลไมต์ (Dolomite)

โดโลไมต์ [26] หรืออีกชื่อหนึ่งที่เรียกว่า แคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Calcium Magnesium Carbonate : $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ซึ่งโดโลไมต์จัดเป็นหินคาร์บอน (Carbonate rock) โดยรูปทั่วไปของโดโลไมต์จะยังไม่สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เลย จึงต้องผ่านกระบวนการเผา (Calcination) ก่อนเพื่อทำให้รูปของแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต แตกตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์

(CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และมีองค์ประกอบอื่นๆอีกเพียงเล็กน้อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น

2.12.1 สมบัติทั่วไปของโดโลไมต์

โดโลไมต์จะมีลักษณะทางกายภาพ เป็นผงมีสีขาว ผิวมันแววมณีเหมือนแก้ว ทึบแสง ความแข็งตามมาตรฐานของ Mohs' scale ประมาณ 3.5 ถึง 4 ความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.82 ถึง 2.95 และความพรุนอยู่ที่ 8.6 และมีสมบัติทางเคมี คือ สามารถเกิดการทำปฏิกิริยาในกรดเกลือที่เจือจางได้ดี และเมื่อทำไปละลายน้ำจะให้ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง pH 9.0 ถึง 10.71



รูปที่ 2.19 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ [26]

โดยเราสามารถพบแร่โดโลไมต์ได้ทั่วทั้งประเทศไทยและพบได้หลายจังหวัด อาทิเช่น ภาคเหนือ พบที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ ลำปาง เชียงราย แพร่ ลำพูน น่านและอุดรดิตถ์ เป็นต้น ภาคกลาง พบที่จังหวัดนครสวรรค์ สระบุรีและลพบุรี เป็นต้น ภาคตะวันตก พบที่จังหวัดชลบุรี จันทบุรี ระยอง และปราจีนบุรี เป็นต้น และภาคใต้ พบที่จังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา พัทลุง และตรัง เป็นต้น

2.12.2 ประโยชน์ของโดโลไมต์

- ใช้เป็นหินคลุกได้ (Aggregate) สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ใช้สำหรับสร้างคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์ที่ทนต่อการขัดสี (Abrasion) แต่จะต้องมีไม่มีการจำพวกดินดานผสมอยู่ด้วย เพราะจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย
- ใช้เป็นสารที่เชื่อในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เพื่อเป็นตัวดึงซิลิกาแมงกานีสให้กลายเป็นสารมลทินลอยขึ้นบนผิวของน้ำโลหะ
- ใช้ปรับค่าความเป็นกรดเบสของดินหรือแก้ดินเปรี้ยวได้

- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น ซีโตรีตเทียม เกลือแมกนีเซียม
- ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นสารเสริมวัสดุทนความร้อน
- ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกสีหรือฟอกขาวกระดาษ

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chaiwong และคณะ [27] ศึกษาการสลายตัวของสาหร่ายโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าการสลายตัวสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการไฮเดรชัน (Hydration) กระบวนการกลั่นสลาย (Devolatilization) และกระบวนการสลายตัวของของแข็ง (solid decomposition) นอกจากนี้พบว่า อุณหภูมิในการสลายตัวที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้ได้ผลผลิตร้อยละ (Percent yield) ของไบโอออยด์และไบโอชาร์สูงสุด

Hu และคณะ [28] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส ปัจจัยแรกได้ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสลายตัวของสาหร่าย พบว่าที่อุณหภูมิต่ำผลผลิตร้อยละของของแข็งจะมีค่าสูง และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลผลิตร้อยละจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดการแตกตัวใหม่ (Secondary thermal decomposition) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดลง ในส่วนของแก๊สจะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้าม และส่วนของเหลวจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมที่อยู่ 500 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่สองศึกษาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารตั้งต้น ผลที่ได้คือ อนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 0.500 มิลลิเมตร จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูง และได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งต่ำ แต่เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ใหญ่เกินกว่า 0.500 มิลลิเมตร ส่งผลให้ของเหลวมีค่าลดลง และของแข็งมีค่าสูงขึ้น ปัจจัยที่สามศึกษาอัตราการป้อนไนโตรเจน พบว่า อัตราการป้อนไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที่ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด

Maisano และคณะ [29] ศึกษาการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างชนิดกันในกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบไปเป็นผลผลิตที่สนใจ (Conversion percent) ให้มีค่าสูงกว่าไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพบว่า โดโลไมต์มีการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบไปเป็นผลผลิตที่สนใจ จาก 60.15 เป็น 66.01 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโดโลไมต์นั้นพบว่า เปอร์เซ็นต์ถ่านชาร์จะมีค่า 33.99 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันชีวภาพ 41.38 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าลดลงจากเดิมเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ในทางกลับกันแก๊สจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 15.12 เป็น 24.62 เปอร์เซ็นต์

Ly และคณะ [30] ศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี ซึ่งในน้ำมันชีวภาพส่วนใหญ่ประกอบด้วย ไดแอนไฮโดรแมนนิทอล (Dianhydromannitol) ไอโซซอร์ไบด์ (Isosorbide) และคีโตน (Ketone) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีไซโคเพนทาโนน (Cyclopentenone) สารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen-containing compounds) และฟีนอล (Phenolic) อีกเล็กน้อย ซึ่งจะมีไดแอนไฮโดรแมนนิทอลมากถึง 34.45 เปอร์เซ็นต์



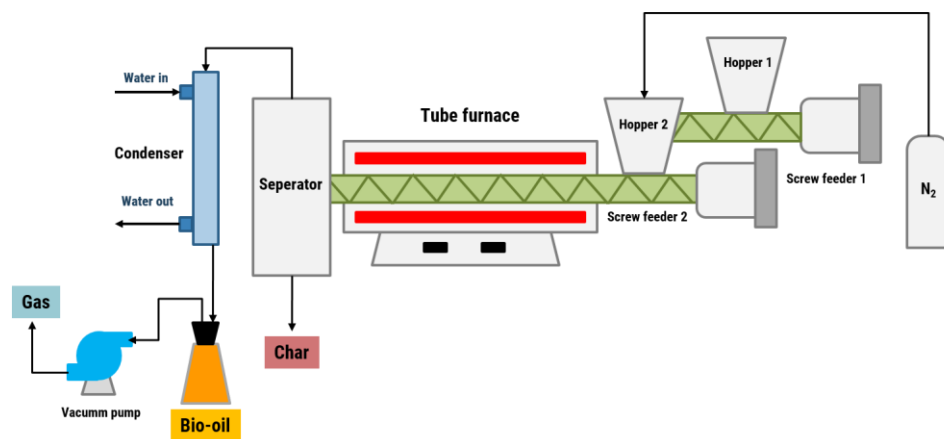
บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้มหาหว่ายสายพันธุ์ *Ceratophyllum demersum* L. หรือมหาหว่ายพุงชะโดเป็นวัตถุดิบหลัก โดยมีการเก็บเกี่ยวจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ หลังจากการเก็บเกี่ยว จะถูกทำให้สะอาดและทำการอบแห้ง เพื่อนำไปบดและแยกขนาดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ในส่วนเครื่องปฏิกรณ์จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาอบลมร้อนแบบใช้แก๊สหุงต้ม เป็นเตาอบที่ใช้แก๊สหุงต้มเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยมีความร้อนภายในระบบประมาณ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส ใช้อบไล่ความชื้นของมหาหว่ายให้มีความแห้งและสามารถนำไปบดได้ โดยระยะเวลาที่ใช้อบประมาณ 6 ถึง 8 ชั่วโมง
2. เตาอบลมร้อนแบบใช้ไฟฟ้า เป็นเตาอบที่ให้ความร้อนที่สูงกว่าเตาอบลมร้อนแบบใช้แก๊สหุงต้ม โดยใช้อบไล่ความชื้นภายในของมหาหว่าย มีอุณหภูมิในระบบประมาณ 105 องศาเซลเซียส อบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. เครื่องแยกขนาดอนุภาคเฉลี่ยและตะแกรงร่อนขนาด เป็นเครื่องแยกอนุภาคของยี่ห้อ Endecott Shaker EF.1-1M411 ใช้กำลังไฟฟ้า 240 วัตต์ 50 เฮิร์ต โดยขนาดของตะแกรงร่อนอยู่ที่ 250 500 และ 850 ไมครอน
4. เตาเผาสำหรับการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในการไพโรไลซิส โดยจะแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัย

จากรูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิสในงานวิจัยนี้ โดยส่วนประกอบจะแสดงตามรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้ 1. ช่องเก็บสาร (Hopper 1, Hopper 2) ทำหน้าที่ป้อนสารและพักสารตั้งต้นก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง 2. ชุดสกรูขนาด 40 และ 120 เซนติเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 และ 10 เซนติเมตร (Screw feeder 1, Screw feeder 2) ตามลำดับ ทำหน้าที่ลำเลียงสารตั้งต้นเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ 3. เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิสพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Tube furnace) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ และทำการเผาไหม้สารตั้งต้นที่เข้ามาในส่วนนี้ 4. ชุดแยกถ่านชาร์ (Separator) ทำหน้าที่แยกส่วนของแข็งและกักเก็บไว้ สำหรับผลิตภัณฑ์อื่นๆจะเข้าสู่ชุดควบแน่นสาร 5. ชุดควบแน่นสาร (Condenser) ทำหน้าที่ควบแน่นสารระเหยและตกลงในชุดเก็บน้ำมันชีวภาพ 6. ชุดเก็บน้ำมันชีวภาพ (Flask) ทำหน้าที่เก็บผลิตภัณฑ์เหลวที่ถูกควบแน่นลงมาจากชุดควบแน่น 7. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ทำหน้าที่ดูดอากาศเพื่อทำให้ระบบอยู่ในภาวะไนโตรเจน 8. ถังแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen tank) ทำหน้าที่กักเก็บแก๊สไนโตรเจนและป้อนไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเพื่อให้ระบบอยู่ในภาวะไนโตรเจน



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์

จากรูปที่ 3.3 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสสหสาหร่าย โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 และเครื่องแมสสเปคโตรมิเตอร์ รุ่น 5975C inert XL MSD เป็น detector จากบริษัท Agilent technology จำกัด และใช้ Capillary column จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น HP-5MS ขนาด 30 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.250 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

จากรูปที่ 3.4 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph, GC) รุ่น GC7890 มี detector แบบ Thermal Conductivity Detector จากบริษัท Agilent technology จำกัด ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสสมหสาหร่าย



รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น

จากรูปที่ 3.5 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Distillation Gas Chromatography, DGC) จากบริษัท Agilent technology จำกัด ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสสมหสาหร่าย เพื่อแยกสารไฮโดรคาร์บอนตามคาบจุดเดือดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH

จากรูปที่ 3.6 แสดงเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH (CHN analysis) จากบริษัท LECO จำกัด ใช้สำหรับวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจน ซึ่งปริมาณของออกซิเจนที่ได้หาได้จากการคิดคำนวณโดยใช้ผลต่างของธาตุ (By Difference)



รูปที่ 3.7 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

จากรูปที่ 3.7 แสดงเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) รุ่น AC500 จากบริษัท LECO จำกัด ใช้สำหรับหาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสสหสาหร่าย



รูปที่ 3.8 เครื่องไตเตรท

จากรูปที่ 3.8 แสดงเครื่องไตเตรท (Titration) จากบริษัท Metrohm ใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพที่เกิดจากการไพโรไลซิสสหสาหร่าย



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

จากรูปที่ 3.9 แสดงเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) รุ่น TGA701 จากบริษัท LECO จำกัด ใช้สำหรับวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของมหาสาหร่าย

3.2 สารตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. สาหร่ายสายพันธุ์ *Ceratophyllum demersum* L. หรือสาหร่ายพวงชะโด ที่มีขนาดอยู่ในช่วงต่ำกว่า 250 250-500 และ 500-850 ไมครอน
2. โดโลไมต์ (Dolomite)
3. ไนโตรเจน (Nitrogen gas) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 บรรจุในถังความดันสูง จากบริษัท BIG (ประเทศไทย) จำกัด
4. อะซิโตน (Acetone) เกรดการค้า

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การเตรียมและวิเคราะห์ชีวมวล การออกแบบการทดลอง วิธีการทดลอง และการพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของผลิตภัณฑ์

3.3.1 การเตรียมสารตั้งต้นและวิเคราะห์ชีวมวล

การเตรียมมหาหุ่ย

1. ทำการเกี่ยวกับมหาหุ่ยจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ จากนั้นทำการชะล้างมหาหุ่ยประมาณ 2-3 ครั้งด้วยน้ำสะอาด เพื่อล้างสิ่งสกปรกที่ติดมากับมหาหุ่ยให้ได้มากที่สุด
2. ทำการผึ่งมหาหุ่ยที่เปียกจากการล้าง โดยใช้แสงแดดธรรมชาติ เพื่อไล่ความชื้นจากมหาหุ่ยให้ได้มากที่สุด เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานในการไล่ความชื้นจากเตาอบลมร้อน
3. ทำการอบแห้งมหาหุ่ย โดยใช้เตาอบลมร้อนแบบใช้แก๊สหุงต้ม ที่อุณหภูมิ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ถึง 8 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นก่อนทำการบด
4. ทำการบดมหาหุ่ย
5. ทำการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องแยกขนาดอนุภาคเฉลี่ยและตะแกรงร่อนขนาดให้มีขนาดอยู่ในช่วงต่ำกว่า 250 250-500 และ 500-850 ไมครอน
6. ทำการอบเพื่อไล่ความชื้นภายในของมหาหุ่ย โดยใช้เตาอบลมร้อนแบบใช้ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
7. ทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของมหาหุ่ย ดังต่อไปนี้
 - วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของมหาหุ่ยด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis/Differential thermal analysis, TGA/DTG)
 - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D3712)
 - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D3176)
 - วิเคราะห์หาค่าความร้อนของมหาหุ่ย (ASTM D5865)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์

1. ทำการล้างชุดเครื่องแก้วที่ใช้สำหรับการเผาโคโลไมต์
2. ทำการเผาโคโลไมต์ในเตาเผาตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ทำการเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่ได้ในตู้ดูดความชื้น พร้อมนำไปใช้งาน

3.3.2 ออกแบบการทดลอง

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ในกระบวนการที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส ในภาวะคงที่ที่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 250-500 ไมครอน อัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที

2. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ในกระบวนการที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง ต่ำกว่า 250 250-500 และ 500-850 ไมครอน ในภาวะคงที่ที่ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที
3. ศึกษาผลของอัตราการป้อนชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการที่มีอัตราการป้อนอยู่ในช่วง 0.41 0.61 1.13 2.91 และ 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในภาวะคงที่ที่ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 250-500 ไมครอน และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที
4. ศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนใช้ในกระบวนการที่มีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 40 80 120 160 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ในภาวะคงที่ที่ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 250-500 ไมครอน และอัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
5. ศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่ใช้ในกระบวนการที่มีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาตัวแปรที่ 1 ถึง 4

3.3.3 วิธีการทดลอง

1. ทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนจากถังเก็บแก๊สไนโตรเจนพร้อมปรับให้มีอัตราการไหลอยู่ที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในระบบและให้ระบบอยู่ภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส
2. ทำการเปิดระบบของเครื่องทำความเย็นที่เข้าสู่คอนเดนเซอร์เพื่อให้สารระเหยที่เกิดจากการไพโรไลซิสถูกควบแน่นได้
3. เปิดเครื่องปฏิกรณ์และทำการปรับค่าอุณหภูมิตามตัวแปรที่สนใจศึกษา โดยอุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 400 องศาเซลเซียส
4. เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าตามที่กำหนดไว้ นำมหาหุ่ยที่ผ่านการอบแล้วปริมาณ 150 กรัมใส่ลงไปในช่องเก็บสาร โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้จะมีการเปลี่ยนไปตามที่กำหนดไว้ ได้แก่ ต่ำกว่า 250 250-500 และ 500-850 ไมครอน ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการทดลอง
5. ทำการปรับความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ในการป้อนสารตั้งต้นตามที่กำหนดไว้
6. เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สออกจากเครื่องปฏิกรณ์ผ่านชุดควบแน่น
7. ทำการคำนวณร้อยละผลได้ (yield) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นพร้อมบันทึกผลการทดลอง

8. ทำซ้ำ 2 ครั้ง โดยสุ่มการทดลองพร้อมบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ และหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพหรือผลิตภัณฑ์เหลวจากมหาหุ่ยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
9. ศึกษาตัวแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย อัตราการป้อนสารตั้งต้น และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน โดยทำตามขั้นตอน 1 ถึง 7 ปรับค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อศึกษาปัจจัยตามวัตถุประสงค์ของงานและหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากมหาหุ่ยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
10. เมื่อทราบภาวะที่เหมาะสม จะทำการผสมโดโลไมต์กับมหาหุ่ยเข้าด้วยกัน และทำตามขั้นตอน 1 ถึง 7 พร้อมศึกษาผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

3.3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของผลิตภัณฑ์

1. วิเคราะห์สมบัติทางเคมี

- วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter)
- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านชาร์
- วิเคราะห์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันชีวภาพโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography Mass Spectrometry)
- การวิเคราะห์หาประเภทของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Distillation Gas Chromatography)

2. วิเคราะห์สมบัติทางกาย

- วิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (Density)
- วิเคราะห์ค่าความหนืด (Viscosity)
- วิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมดด้วยการไตเตรต (Total acid Number, TAN)

3.4 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง

โดยการคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์เหลว ถ่านชาร์ และแก๊ส จะแสดงดังสมการต่อไปนี้

- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์เหลว (% Liquid yield) = $\frac{W_{\text{ผลิตภัณฑ์เหลว}}}{W_{\text{ชีวมวล}}} \times 100$
- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของถ่านชาร์ (% Solid yield) = $\frac{W_{\text{ถ่านชาร์}}}{W_{\text{ชีวมวล}}} \times 100$

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

$W_{\text{ผลิตภัณฑ์เหลว}}$ = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการทดลอง

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

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



บทที่ 4

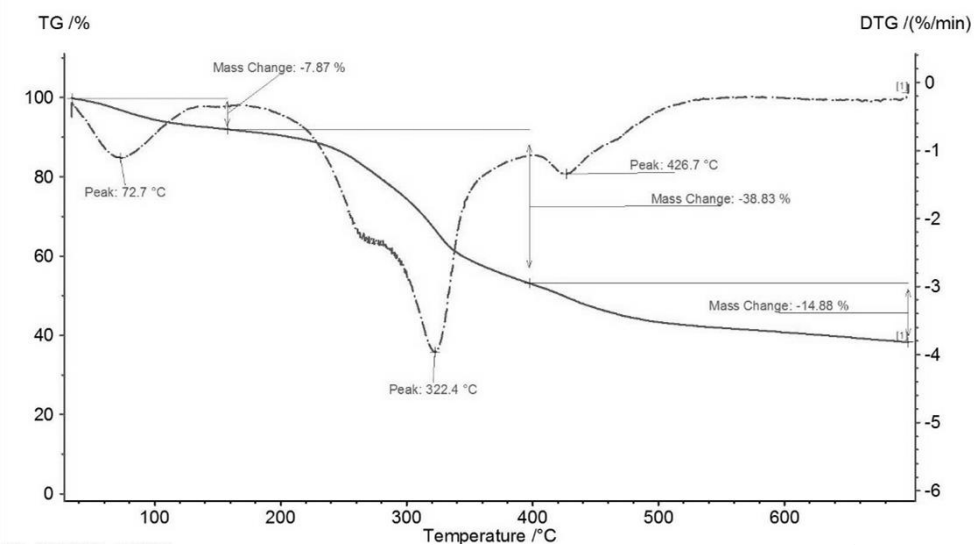
การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส มหาหุ่ย *Ceratophyllum demersum* L. หรือ มหาหุ่ยพุงชะโด ภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ แบบต่อเนื่อง โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาภายในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย อุณหภูมิไพโรไลซิส ขนาดของอนุภาค อัตราการป้อนของสารตั้งต้น และอัตราการไหลของไนโตรเจน นอกจากนี้ยังศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ในภาวะเดียวกัน และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งทางกายภาพและทางเคมี

4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของมหาหุ่ยพุงชะโด

ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นและลักษณะของมหาหุ่ยพุงชะโดจะวิเคราะห์ผ่านเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

4.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของมหาหุ่ยพุงชะโดด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของมหาหุ่ยในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที และความดันบรรยากาศไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.1 แสดงการศึกษาการสลายตัวของมหาสารด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA/DTG) ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ความดันบรรยากาศไนโตรเจนที่ 50 มิลลิลิตร พบว่าช่วงการสลายตัวของมหาสารนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของความชื้นหรือน้ำที่อยู่ภายในมหาสารผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ต่อมาช่วงที่สองเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวสารระเหยของมหาสารผ่านปฏิกิริยากำจัดสารระเหย (Devolatilization) และช่วงที่สามเริ่มสลายตัวที่ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของคาร์บอนหนักโดยมีการสลายตัวอย่างช้าๆผ่านปฏิกิริยาการสลายตัวของของแข็ง (Solid residue decomposition) [27] และการสลายตัวของมหาสารทั้งหมดจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 550 องศาเซลเซียส โดยจะมีคาร์บอนคงตัวและขี้เถ้ามากถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับปริมาณขององค์ประกอบแบบประมาณจะมีค่าที่สอดคล้องกัน ดังตารางที่ 4.1

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแยกธาตุของมหาสารฟุ้งชะโด

โดยตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณของมหาสาร พบว่ามหาสารจะประกอบไปด้วย ความชื้น (Moisture) ร้อยละ 5.46 โดยน้ำหนัก สารระเหย (Volatile matter) ร้อยละ 34.22 โดยน้ำหนัก ขี้เถ้า (Ash) ร้อยละ 29.50 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ร้อยละ 30.82 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของมหาสาร

วิเคราะห์แบบประมาณ	ร้อยละโดยน้ำหนัก*
ความชื้น	5.46
สารระเหย	34.22
ขี้เถ้า	29.50
คาร์บอนคงตัว	30.82
วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก*
คาร์บอน	32.94
ไฮโดรเจน	4.29
ไนโตรเจน	3.45
ออกซิเจน**	59.32

หมายเหตุ : *พื้นฐานแห้ง (dry basis) **วิธีหาโดยผลต่าง (by the different)

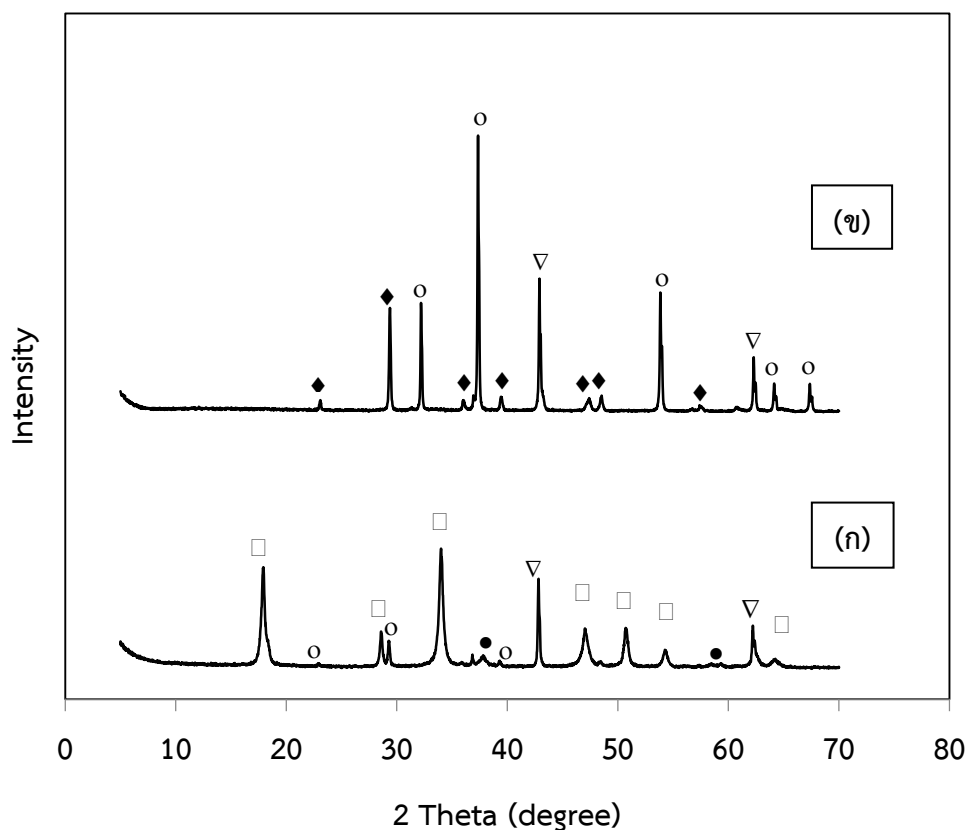
ซึ่งปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้บ่งบอกปริมาณน้ำมันชีวภาพว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด โดยสารระเหยของมหาหุรายที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเราสามารถคาดคะเนปริมาณน้ำมันชีวภาพที่จะออกมาจากกระบวนการไพโรไลซิสโดยมีค่าต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด และในส่วนผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของมหาหุราย พบว่ามหาหุรายจะประกอบไปด้วย คาร์บอน (Carbon) ร้อยละ 32.94 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจน (Hydrogen) ร้อยละ 4.29 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจน (Nitrogen) ร้อยละ 3.45 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 59.32 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรโมเลกุลอย่างง่าย คือ $C_{2.7}H_{4.3}O_{3.7}N_{0.2}$

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

ผลการวิเคราะห์และสมบัติพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์จะถูกวิเคราะห์ผ่านเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD)

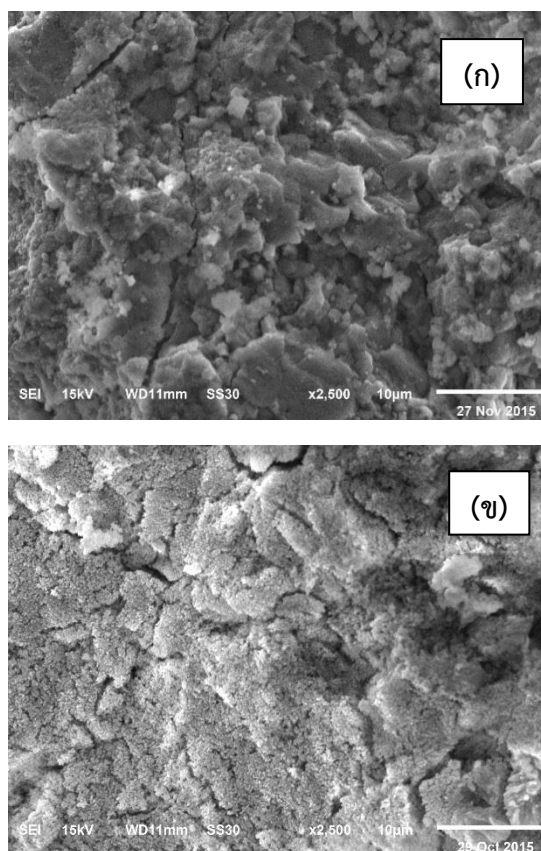
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อนและหลังแคลไซน์ด้วยเทคนิค XRD จะแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ จะแสดงองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ในโครงสร้างผลึกและพบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ปนอยู่ เมื่อทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะแสดงพีคของแคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นแต่ องค์ประกอบของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะหายไปเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าข้างต้นว่า เมื่อทำการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ให้อยู่ในรูปของแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์มากขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสได้



รูปที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของ (ก) โดโลไมต์ก่อนแคลไซน์ (ข) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อ ● แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์, □ แคลเซียมไฮดรอกไซด์, ◆ แคลไซต์, ▽ แมกนีเซียมออกไซด์ และ ○ แคลเซียมออกไซด์

4.2.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

จากรูปที่ 4.3 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของโดโลไมต์ โดยรูปที่ 4.3 (ก) แสดงโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์และรูปที่ 4.3 (ข) แสดงโดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 2,500 เท่า พบว่าโดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมีพื้นผิวที่ขรุขระและมีความเป็นรูพรุนมากกว่าโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ แสดงให้เห็นถึงการทำแคลซิเนชัน (Calcination) ที่มีความสำคัญและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสให้อยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถนำไปใช้ได้เหมาะสม ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน



รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของโดโลไมต์ (ก) โดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์
(ข) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET)

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (Surface area) และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิค (Brunauer Emmett Teller, BET)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุน (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุน (S_{BET}) (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)
ก่อนแคลไซน์	8.00	0.01
หลังแคลไซน์	19.95	0.10

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์มีพื้นที่ผิวรูพรุนเท่ากับ 8.00 ตารางเมตรต่อกรัม หลังจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงมีพื้นที่ผิวรูพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 19.95 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากการทำแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของคาร์บอนเนตกลายเป็นออกไซด์ของโลหะผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอนเนชัน (Decarbonation) ตามสมการที่ 4.1 ถึง 4.3 ซึ่งสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อการแตกตัวโมเลกุลของสารตั้งต้น การที่พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นหลังจากการแคลไซน์จะกำจัดมลทิน (Impurity) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทำให้สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งเสริมการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น



4.2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ด้วยเทคนิค XRF

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
CaO	59.80
MgO	33.50
SiO ₂	0.39
Fe ₂ O ₃	0.23
Al ₂ O ₃	0.19
Other	5.89

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 59.80 และปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 33.50

4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากมหาหุ่ยพุงชะโด

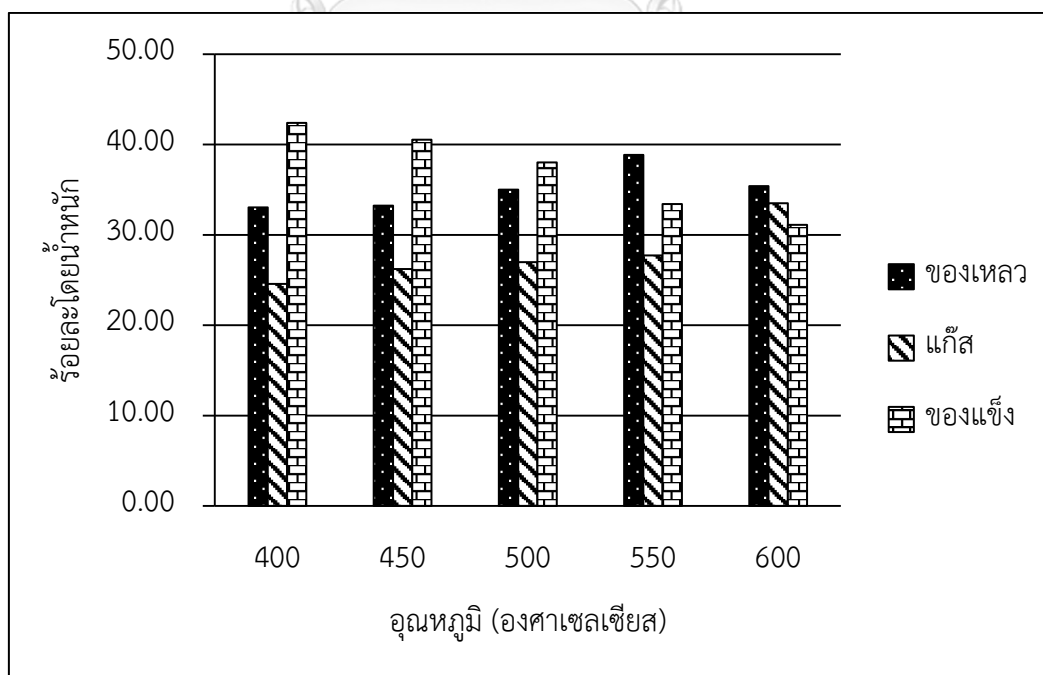
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากมหาหุ่ยพุงชะโด ประกอบด้วยตัวแปรที่สำคัญ 4 ตัวแปร คือ

1. อุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้เท่ากับ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส
2. ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเฉลี่ยเท่ากับ น้อยกว่า 250 250-500 และ 500-850 ไมครอน
3. อัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 0.41 0.61 1.13 2.91 และ 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
4. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 80 120 160 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

วิธีการทดลองเป็นการศึกษาที่ละปัจจัย (Univariate) แบบสุ่มและทำซ้ำในแต่ละการทดลอง 2 ครั้ง

4.3.1 ผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้ต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟโรไลสมหาหุ่ยพุงชะโดในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองแสดงอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้โดยมีช่วงอยู่ที่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลวจะอยู่ระหว่าง 33.04 ถึง 38.86 โดยน้ำหนัก เมื่อให้ตัวแปรอื่นๆ คงที่ ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 250 ถึง 500 ไมครอน อัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.4 แสดงผลของช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ในภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยปัจจัยอุณหภูมิไพโรไลซิสถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องตั้งแต่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส กลไกของการเกิดการไพโรไลซิสของมหาหุ่ยในช่วงแรกที่อุณหภูมิต่ำ 100-120 องศาเซลเซียส เป็นการดึงน้ำที่ผิวและภายในเซลล์ของมหาหุ่ยออก จากนั้นจะเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200-280 องศาเซลเซียส โดยสารประกอบจำพวกกลีโคไซด์และคาร์โบไฮเดรตจะเกิดการแตกสลายของพันธะคาร์บอนต่อกับคาร์บอนเป็นสารระเหยและแก๊สที่ไม่ควบแน่น จากนั้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 ถึง 450 องศาเซลเซียส จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33.04 เป็น 33.23 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารจำพวกโปรตีนภายในโครงสร้างมหาหุ่ย [31] โดยโปรตีนมีช่วงการสลายตัวอยู่ในช่วง 320 ถึง 450 องศาเซลเซียส ทำให้โปรตีนเกิดการสลายตัวได้ดีในช่วงนี้ และเกิดเป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นกลับมาเป็นอยู่ในผลิตภัณฑ์เหลวได้ ต่อมาเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสอย่างต่อเนื่อง พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 38.86 โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการแตกสลายและปฏิกิริยาเคมีความร้อนหลายขั้นตอน ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาคาร์บอซิเลชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนเซชัน จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าเพิ่มสูงมากที่สุดในกระบวนการไพโรไลซิส โดยสมการการสลายตัวของชีวมวลจะแสดงดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

ชีวมวล \longrightarrow ผลิตภัณฑ์เหลว + ถ่านชาร์ + ผลิตภัณฑ์แก๊ส (แก๊สมีเทน + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ + แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ + แก๊สไฮโดรเจน) + น้ำ + อื่นๆ

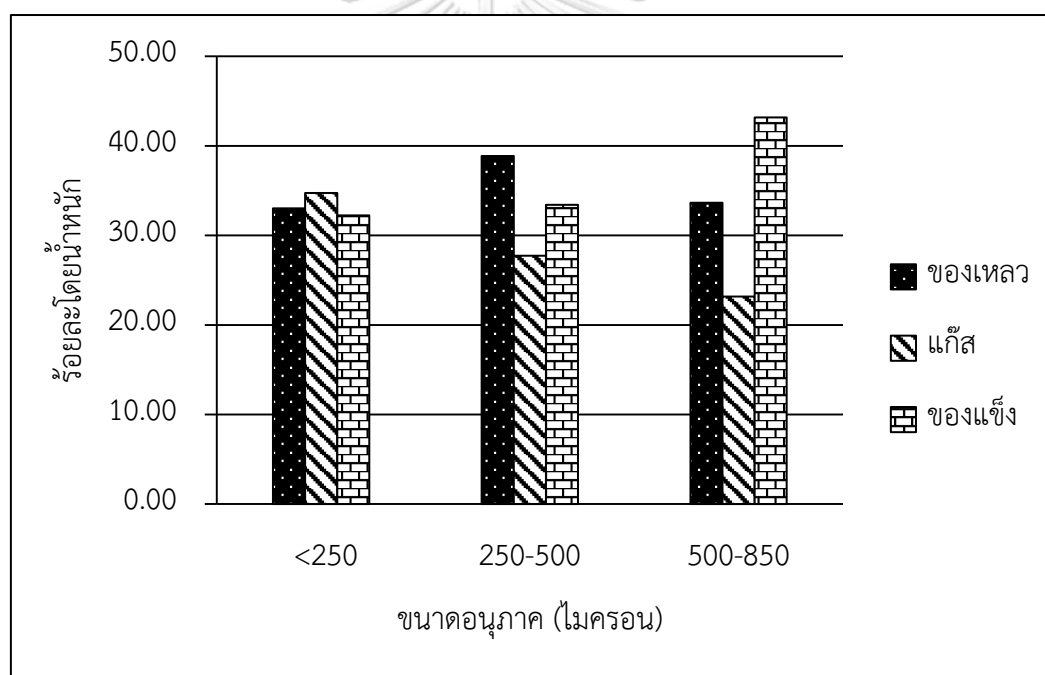
ของเหลวอินทรีย์ \longrightarrow ผลิตภัณฑ์เหลว (สารจำพวกแอมโรมาติก) + ถ่านชาร์ + ผลิตภัณฑ์แก๊ส (แก๊สมีเทน + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ + แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ + แก๊สไฮโดรเจน) + น้ำ + อื่นๆ

แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 600 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิในการสลายตัวที่สูงเกินไป ส่งผลให้เกิดการสลายทางความร้อนขั้นทุติยภูมิ (Secondary thermal decomposition) ของสารระเหยกลายเป็นแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถควบแน่นกลับมาในรูปของผลิตภัณฑ์เหลวได้ แต่จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในรูปผลิตภัณฑ์แก๊ส

ดังนั้นจากการศึกษาผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิส พบว่าอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ 550 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด โดยมีร้อยละ 38.86 โดยน้ำหนัก จึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการสลายตัวของมหาสารร้ายผ่านกระบวนการไฟโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

4.3.2 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟโรไลซิสมหาสารร้ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้โดยมีช่วงอยู่ที่ น้อยกว่า 250 ถึง 850 ไมครอน พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลวจะอยู่ระหว่าง 33.03 ถึง 38.86 โดยน้ำหนัก เมื่อให้ตัวแปรอื่นๆ คงที่ ได้แก่ อุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.5 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.5 แสดงผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดอนุภาคเฉลี่ยจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ต่ำกว่า 250 จนถึง 850 ไมครอน พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 250 ถึง 500 ไมครอนจะมีค่าผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด โดยมีร้อยละผลได้อยู่ที่ 38.86 โดยน้ำหนัก และเมื่อทำการลดขนาดอนุภาคเฉลี่ยลง ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่ำกว่า 250 ไมครอน พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าลดลงจากร้อยละ 38.86 เป็น 33.03 โดยน้ำหนัก เนื่องจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่ำกว่า 250 ไมครอน มีขนาดเล็กมาก สามารถเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี จึงทำให้ความร้อนจาก

เครื่องปฏิกรณ์แพร่ผ่านเข้าไปภายในมหาหรัยได้และเกิดการสลายตัวได้ดี ส่งผลให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนแบบขั้นทุติยภูมิ (Secondary thermal decomposition) ของสารระเหยกลายเป็นแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถกลับมาในรูปของผลิตภัณฑ์เหลวได้ [32] ผลิตภัณฑ์เหลวจึงมีค่าลดลงและผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อทำการเพิ่มขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 500 ถึง 850 ไมครอนสามารถอธิบายได้ว่าผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าร้อยละ 33.65 โดยน้ำหนัก แต่พบว่าผลิตภัณฑ์ของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นสูง โดยมีร้อยละ 43.17 โดยน้ำหนัก เนื่องจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยขนาดใหญ่จะมีการถ่ายโอนความร้อนที่ต่ำ (ซึ่งตรงข้ามกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่มีขนาดเล็ก) ทำให้เกิดการสลายตัวของมหาหรัยได้น้อยและเกิดการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ สารระเหยที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อยและเหลือเถ้าของมหาหรัยจำนวนมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งมีค่ามากขึ้น

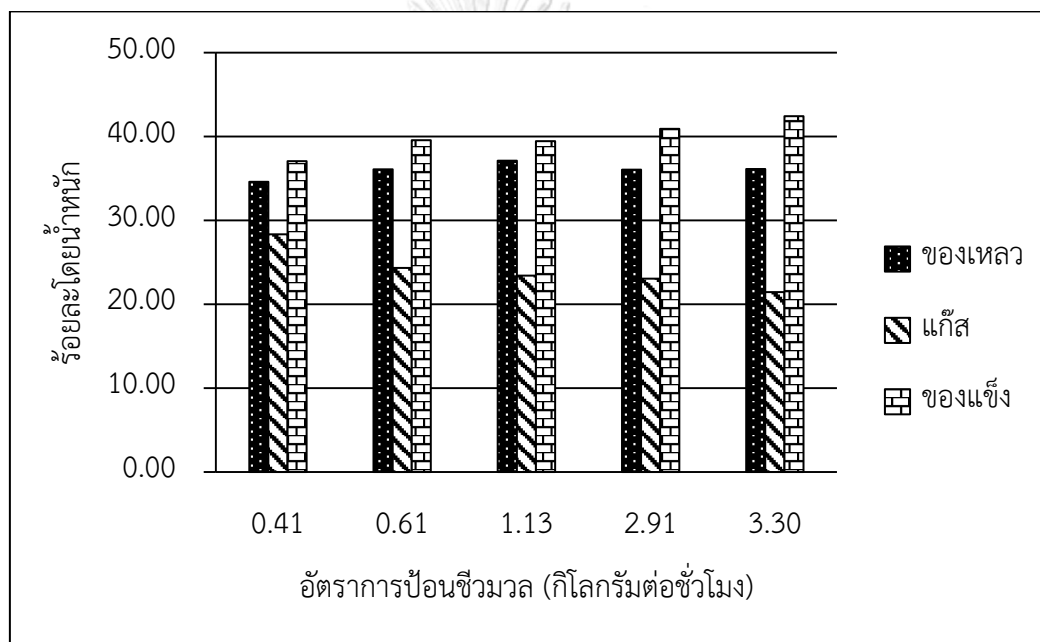
ดังนั้นจากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ย พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 250 ถึง 500 ไมครอนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด โดยมีร้อยละ 38.86 โดยน้ำหนัก จึงเป็นขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เหมาะสมที่ใช้ในการสลายตัวของมหาหรัยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

4.3.3 ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสมหาหรัยในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองแสดงอัตราการป้อนชีวมวลที่ใช้โดยมีช่วงอยู่ที่ 0.41 ถึง 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลวจะอยู่ระหว่าง 34.60 ถึง 37.12 โดยน้ำหนัก เมื่อให้ตัวแปรอื่นๆคงที่ ได้แก่ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 250 ถึง 500 ไมครอน และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที โดยวิธีวัดอัตราการป้อนสารตั้งต้น เราจะทำการตั้งค่าอัตราการป้อนสารตั้งต้นให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.41 ถึง 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและทำการจับเวลาหลังจากการป้อนชีวมวล โดยเวลาที่ใช้จะมีค่าเท่ากันคือ 10 นาที ดังนั้นระยะเวลาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (Residence Time) จะแปรผกผันกับอัตราการป้อนสารตั้งต้นที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระยะเวลาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่ออัตราการป้อนสารตั้งต้น

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราการป้อนที่ 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจะมีค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวอยู่ที่ 37.12 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่ามากที่สุด เป็นผลมาจากระยะเวลาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (Residence Time) [33, 34] โดยที่อัตราการป้อนชีวมวลที่มีค่าต่ำ ชีวมวลหรือสารตั้งต้นจะมีระยะเวลาอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ยาวนานกว่าอัตราการป้อนชีวมวลที่มีค่าสูงๆ จึงทำให้ความร้อนแพร่เข้าไปภายในมหาหรัยได้มาก ส่งผลให้ได้สาร

ระเหยและควบแน่นกลับมาในรูปผลิตภัณฑ์เหลวมากนั่นเอง แต่พบว่าเมื่ออัตราการป้อนต่ำที่ 0.41 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะมีค่าผลิตภัณฑ์เหลวลดลงเล็กน้อยแต่มีค่าผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น เนื่องจาก มีระยะเวลาในการสลายตัวมากเกินไปส่งผลให้เกิดการสลายตัวแบบขั้นทุติยภูมิ (Secondary thermal decomposition) ของสารระเหยกลายเป็นแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถกลับมาในรูปของผลิตภัณฑ์เหลวได้ ในทางกลับกันที่อัตราการป้อนสูงที่ 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะมีค่าผลิตภัณฑ์เหลวลดลงเล็กน้อยแต่มีค่าผลิตภัณฑ์ของแข็งมากขึ้น อันเนื่องมาจากระยะเวลาที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์สั้นเกินไปและเกิดการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งมีค่าเพิ่มสูงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารตั้งต้น

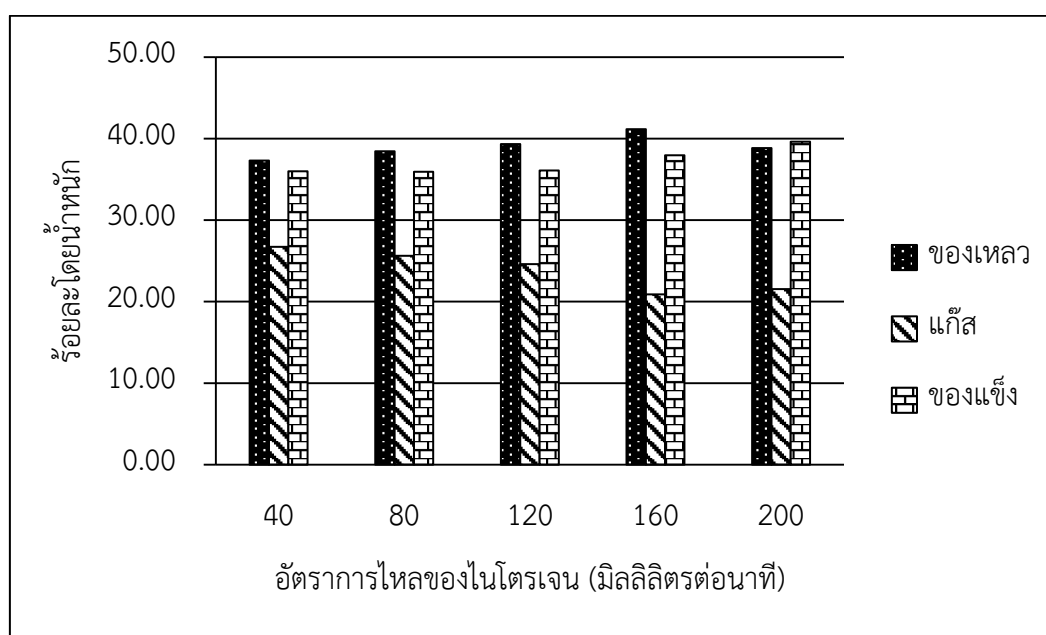


รูปที่ 4.6 ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

ดังนั้นจากการศึกษาผลของอัตราการป้อนชีวมวล พบว่าอัตราการป้อนชีวมวลที่ 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด โดยมีร้อยละ 37.12 โดยน้ำหนัก จึงเป็นอัตราการป้อนชีวมวลที่เหมาะสมที่ใช้ในการสลายตัวของมหาหุ่ยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

4.3.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสสำหรับในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองแสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้โดยมีช่วงอยู่ที่ 40 ถึง 200 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลวจะอยู่ระหว่าง 37.30 ถึง 41.16 โดยน้ำหนัก เมื่อให้ตัวแปรอื่นๆคงที่ ได้แก่ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 250 ถึง 500 ไมครอน และอัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

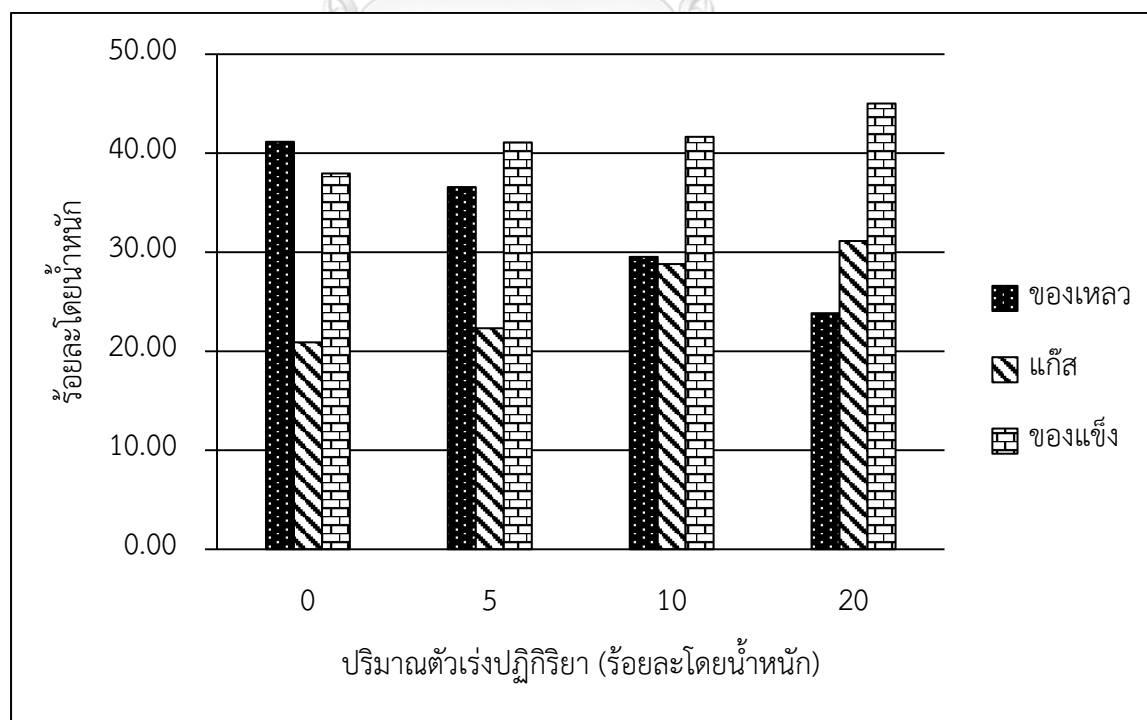
รูปที่ 4.7 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนจาก 40 เป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนให้สูงขึ้นจาก 40 เป็น 160 มิลลิลิตรต่อนาที ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 37.30 เป็น 41.16 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องมาจากปริมาณของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้น โดยแก๊สไนโตรเจนมีหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) ที่สามารถพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางร้อนของมหาสารไปยังชุดควบแน่นและควบแน่นกลับมาในรูปผลิตภัณฑ์เหลว [19] ดังนั้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูง จึงทำให้เกิดการพาสารระเหยได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากขึ้นตาม แต่พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จะมีค่าลดลงเล็กน้อย อาจจะเป็นผลมาจากปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่มากเกินไป ทำให้แก๊สไนโตรเจนบางส่วนเกิดการพาความร้อนที่ใช้สำหรับการสลายตัวออกไปด้วย ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าลดลง

ดังนั้นจากการศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน พบว่าอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 160 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด โดยมีร้อยละ 41.16 โดยน้ำหนัก จึงเป็นอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เหมาะสมที่ใช้ในการสลายตัวของมหาหุรายผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากการทดลองผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากมหาหุรายผงชะโด พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 250 ถึง 500 ไมครอน อัตราการป้อนชีวมวล 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที โดยให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวสูงถึงร้อยละ 41.16 โดยน้ำหนัก

4.4 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม

ผลการทดลองแสดงผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ โดยมีปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ในภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 250 ถึง 500 ไมครอน อัตราการป้อนชีวมวล 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

โดยขั้นตอนการผสมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์กับมหาหุรายจะทำการผสมเชิงกายภาพ (Physical mixing) หลังจากนั้นทำการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ ได้แก่ ร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และใช้ภาวะที่ได้ศึกษาจากการทำไพโรไลซิสมหาหุรายแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยภาวะที่เหมาะสมคือ ซึ่งมีค่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 250 ถึง 500 ไมครอน อัตราการป้อนชีวมวล 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่ออนาที

รูปที่ 4.8 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 0 (ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา) เป็น 20 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์จะมีค่าผลิตภัณฑ์เหลวสูงถึงร้อยละ 41.16 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์เป็น 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าผลิตภัณฑ์เหลวลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 41.16 เป็น 36.58 29.54 และ 23.85 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากโคโลไมต์มีสมบัติช่วยส่งเสริมในการแตกตัว (Cracking) และเปลี่ยนรูปน้ำมันดินที่เกิดขึ้น (Reducing Tar) ทำให้เกิดการแตกตัวที่ติดกลายเป็นแก๊สที่มีขนาดเล็ก ในส่วนของสารระเหยจะเกิดการสลายตัวแบบขั้นทุติยภูมิ (Secondary thermal decomposition) ทำให้สารระเหยที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งไม่สามารถควบแน่นกลับเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ แต่ออกไปในรูปของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเช่นกัน [35] อีกทั้งยังพบว่าโคโลไมต์มีองค์ประกอบที่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นหลัก โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ทำหน้าที่ลดหมู่ออกซิเจนที่เกิดจากการไพโรไลซิสผ่านปฏิกิริยา deoxygenation และส่งเสริมให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ให้มีไฮโดรคาร์บอนอยู่ในช่วงอะตอม 8 ถึง 12 อะตอม ในส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ทำหน้าที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในแง่ของการลดปริมาณหมู่ออกซิเจนซึ่งคล้ายกับแคลเซียมออกไซด์ [36, 37] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าลดลงและผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น

ดังนั้นจากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ พบว่าเมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ลงไปในทุกอัตราส่วนจะทำให้ผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าลดลง แต่จะให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ในภาวะเดียวกัน โดยส่วนต่อไปจะทำการเลือกอัตราส่วนของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์มา 1 ตัวอย่างเพื่อทำการเปรียบเทียบเชิงกายภาพและเชิงเคมี โดยตัวอย่างที่จะนำไปศึกษาต่อจะเลือกจากปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่มากที่สุด นั่นคือการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าผลิตภัณฑ์เหลวร้อยละ 36.58 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์เหลวที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีค่าร้อยละ 41.16 โดยน้ำหนัก

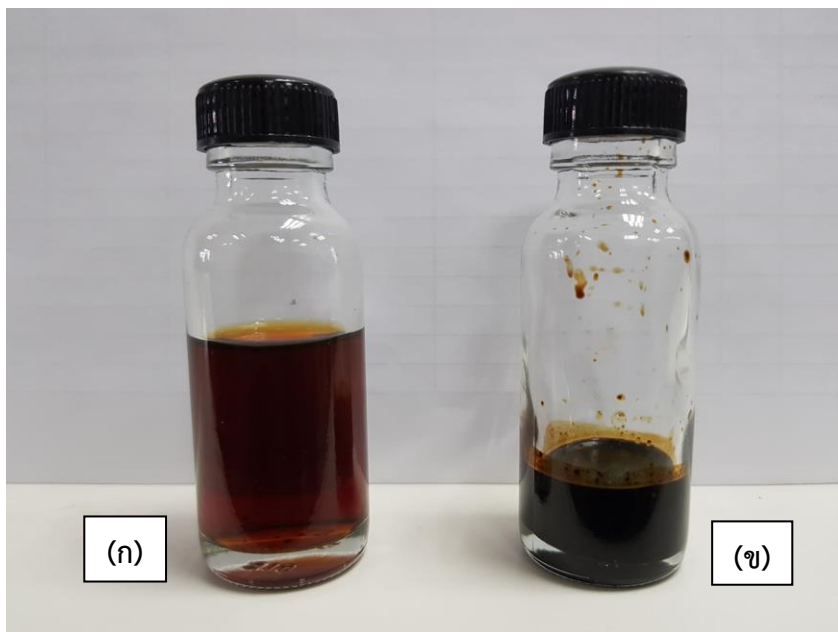
4.5 ผลการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันหนักและน้ำมันเบาในผลิตภัณฑ์ของเหลว

ผลการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีโพรไพลีน 5 โดยน้ำหนักและที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีโพรไพลีนที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 250 ถึง 500 ไมครอน อัตราการป้อนชีวมวล 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.4 ผลอัตราส่วนน้ำมันหนักและน้ำมันเบาในผลิตภัณฑ์ของเหลว

น้ำมันชีวภาพ	ปริมาณน้ำมันชีวภาพ (อัตราร้อยละเปอร์เซ็นต์)	
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก
ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	69.35	30.64
มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	72.57	27.43

จากตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีโพรไพลีน 5 โดยน้ำหนักและที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีโพรไพลีน พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนที่เป็นน้ำมันเบาหรือเฟสที่เป็นน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวใส สีส้มปนน้ำตาล มีความหนืดต่ำ สามารถละลายในน้ำได้ ดังรูปที่ 4.9 (ก) และส่วนที่เป็นน้ำมันหนักหรือน้ำมันชีวภาพ มีลักษณะเป็นของเหลว สีดำ มีหนืดสูง ดูไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่สามารถละลายในน้ำ โดยแสดงดังรูปที่ 4.9 (ข) โดยทั้งสองส่วนสามารถแยกจากผลิตภัณฑ์เหลวโดยใช้วิธีการแยกแบบกรวยแยก นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีโพรไพลีน พบว่าเมื่อทำการเติมโพลีโพรไพลีน อัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักมีค่าแตกต่างจากอัตราส่วนที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีโพรไพลีนจะทำให้เกิดการตัดหมู่ ออกซิเจนภายในโครงสร้างมหสาหรัย โดยอะตอมคาร์บอนต่อกับออกซิเจนในโครงสร้างโปรตีนเกิดการหลุดออกเป็นหมู่ออกซิเจนที่สามารถเกิดการจัดเรียงรูปแบบใหม่หรือเกิดการควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงทำให้อัตราส่วนของน้ำมันเบาที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีโพรไพลีนมีค่าสูงกว่าน้ำมันเบาที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีโพรไพลีน อีกทั้งอะตอมของออกซิเจนที่เหลือจะเกิดการหลุดออกไปพร้อมกับส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.9 น้ำมันเบา (ก) และน้ำหนัหนัก (ข)

4.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสผสมสำหรับในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดจากการไพโรไลซิสผสมสำหรับนั้น จะศึกษาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3176 ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D5865 ดังหัวข้อที่ 4.6.1 และทำการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (Density) วิเคราะห์ค่าความหนืด (Viscosity) และวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมดด้วยการไตเตรต (Total acid Number, TAN) ดังหัวข้อที่ 4.6.2

4.6.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสผสมสำหรับ

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสผสมสำหรับที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ พบว่าน้ำมันเบา มีองค์ประกอบของออกซิเจนและไฮโดรเจนในปริมาณสูง โดยมีค่าร้อยละ 81.89 และ 10.10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าภายในน้ำมันเบา มีองค์ประกอบของน้ำและสารที่มีหมู่ออกซิเจนเป็นหลัก ในทางกลับกันในส่วนของน้ำมันหนักจะมีปริมาณคาร์บอนในปริมาณสูง โดยมีค่าร้อยละ 43.12 โดยน้ำหนัก แสดงว่าน้ำมันหนักที่ได้มีส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนอย่างชัดเจน นอกจากนี้พบว่าถ่านชาร์และผสมสำหรับยังมีองค์ประกอบคาร์บอนที่ใกล้เคียงกันอีกด้วย

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากมหาหุรายที่ไม่มี
การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์

องค์ประกอบ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหุรายไม่มี			มหาหุราย
	การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์			
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก	ถ่านชาร์	
คาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.30	43.12	34.51	32.94
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10.10	8.71	2.79	4.29
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.71	4.91	2.45	3.45
ออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)*	81.89	43.27	60.25	59.32
H/C (โมลต่อโมล)	22.87	2.42	0.97	1.56
O/C (โมลต่อโมล)	11.59	0.75	1.31	1.35
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	-	19.53	12.18	12.27

หมายเหตุ : *จากผลต่าง

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากมหาหุรายที่มี
การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหุรายที่มี			มหาหุราย
	การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 5 โดย			
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก	ถ่านชาร์	
คาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	3.87	40.75	38.89	32.94
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	12.42	6.75	3.01	4.29
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	3.12	7.54	2.16	3.45
ออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)*	80.59	44.96	55.94	59.32
H/C (โมลต่อโมล)	38.51	1.98	0.93	1.56
O/C (โมลต่อโมล)	15.61	0.82	1.08	1.35
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	-	19.26	12.85	12.27

หมายเหตุ : *จากผลต่าง

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสสมหสหารายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าน้ำมันเบา มีองค์ประกอบของออกซิเจนและไฮโดรเจนในปริมาณสูงใกล้เคียงกับน้ำมันเบาที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีค่าร้อยละ 80.59 และ 12.42 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่จะมีค่าของคาร์บอนที่ต่ำ ซึ่งอยู่ที่ร้อยละ 3.87 โดยน้ำหนัก โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ อาจจะมีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำมันเบาที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา และในส่วนของน้ำมันหนักที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณคาร์บอนมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำมันหนักที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่าความร้อนมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบองค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสมหสหารายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสสมหสหาราย					
	น้ำมันเบา		น้ำมันหนัก		ถ่านชาร์	
	ไม่มีการเติม ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ไม่มีการเติม ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ไม่มีการเติม ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา
คาร์บอน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	5.30	3.87	43.12	40.75	34.51	38.89
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	10.10	12.42	8.71	6.75	2.79	3.01
ไนโตรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	2.71	3.12	4.91	7.54	2.45	2.16

องค์ประกอบ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสสหสำหรับ					
	น้ำมันเบา		น้ำมันหนัก		ถ่านชาร์	
	ไม่มีการเติม ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ไม่มีการเติม ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ไม่มีการเติม ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา
ออกซิเจน						
(ร้อยละโดย น้ำหนัก)	81.89	80.59	43.27	44.96	60.25	55.94
H/C (โมลต่อโมล)	22.87	38.51	2.42	1.98	0.97	0.93
O/C (โมลต่อโมล)	11.59	15.61	0.75	0.82	1.31	1.08
ค่าความร้อน (MJ/Kg)	-	-	19.53	19.26	12.18	12.85

จากตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าในส่วนของน้ำมันเบาที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน โดยในส่วนของน้ำมันเบาเป็นส่วนที่ไม่ให้ความสนใจมากนัก เนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่มีค่าความร้อนและไม่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

ในส่วนของน้ำมันหนัก สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณคาร์บอนจะมีค่าลดลงจากร้อยละ 43.12 เป็น 40.75 โดยน้ำหนัก รวมถึงปริมาณไฮโดรเจนที่มีค่าร้อยละ 8.71 เป็น 6.75 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ส่งเสริมให้เกิดการแตกตัวที่ดียิ่งขึ้นจากโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก และโมเลกุลบางส่วนเกิดการดูดซับบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ ทำให้อะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนบางส่วนหลุดออกไปพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งออกไปในรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง [38] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจนมีค่าลดลง และยังส่งผลต่อค่าความร้อนที่เกิดขึ้นโดยพบว่าค่าความร้อนของน้ำมันหนักที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า 19.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่น้ำมันหนักที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าอยู่ที่ 19.26 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเมื่อพิจารณาปริมาณของไนโตรเจนและออกซิเจน

ในน้ำมันหนักที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ พบว่าเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ลงไปจะทำให้ปริมาณออกซิเจนและไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในส่วนออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้อะตอมคาร์บอนและออกซิเจนเกิดการสลายตัวทางความร้อนเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่กลายเป็นน้ำหรือผลิตภัณฑ์แก๊ส ทำให้ออกซิเจนอะตอมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และใน ส่วนไนโตรเจนอะตอมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมหาหรัยเริ่มต้นมีปริมาณไนโตรเจนที่สูง เมื่อผ่านการสลายตัวทางความร้อนด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนที่ดียิ่งขึ้น ทำให้อะตอมของไนโตรเจนหลุดออกมา แต่ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นแต่จะคงอยู่เป็นไนโตรเจนอะตอมและออกมาพร้อมกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีปริมาณไนโตรเจนที่สูง

และในส่วนท้ายเป็นส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์ ด้วยเหตุผลในส่วนของน้ำมันหนักสามารถใช้อธิบายในส่วนของถ่านชาร์ได้ พบว่าปริมาณคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 34.51 เป็น 38.89 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการดูดซับคาร์บอนและไฮโดรเจนมาพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยาและออกมาในรูปของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งทำให้ค่าคาร์บอนและไฮโดรเจนอะตอมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยจะส่งผลต่อค่าความร้อนที่เกิดขึ้นเช่นกัน โดยถ่านชาร์ที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่า 12.18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่ถ่านชาร์ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่า 12.85 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4.8 ค่าการเปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสมหาหรัยที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ และน้ำมันหนักจากแหล่งปิโตรเลียม

องค์ประกอบ	มหาหรัย	น้ำมันชีวภาพ			น้ำมันหนักจากแหล่งปิโตรเลียม ^{40,41}
		ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	จากไม้ ^{39,40}	
คาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	32.94	43.12	40.75	54-58	83-87
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	4.29	8.71	6.75	5.5-7.0	10-14.0
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	3.45	4.91	7.54	0-0.2	0.01-0.7
ออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	59.32	43.27	44.96	35-40	0.05-1.5

องค์ประกอบ	มหาสารชัย	น้ำมันชีวภาพ			แหล่ง ปิโตรเลียม ^{40,41}
		ไม่มีการเติม ตัวเร่งปฏิกิริยา	มีการเติม ตัวเร่งปฏิกิริยา	จากไม้ ^{39,40}	
H/C (โมลต่อโมล)	1.56	2.42	1.98	1.14-1.56	-
O/C (โมลต่อโมล)	1.35	0.75	0.82	0.28-0.45	-
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	12.27	19.53	19.26	19.2-26.73	42.48

หมายเหตุ : [39] Stamatov et al., [40] Zhang et al., [41] Miao et al.

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าการเปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพที่ได้จากแหล่งที่แตกต่างกัน พบว่าน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโตไลไมต์มีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 40.75 ถึง 43.12 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่ามากกว่าคาร์บอนของมหาสารชัยที่มีค่าร้อยละ 32.94 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าเมื่อมหาสารชัยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดการแตกตัวหรือสลายตัวทางความร้อน ส่งผลให้เกิดการหลุดออกของหมู่ออกซิเจนในโครงสร้างโปรตีนและสารประกอบอินทรีย์ [31, 32, 42] ซึ่งสามารถพิจารณาออกซิเจนอะตอมของมหาสารชัยที่มีค่าร้อยละ 59.32 โดยน้ำหนัก และน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าร้อยละ 44.96 และ 43.27 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าคาร์บอนและไฮโดรเจนอะตอมจะส่งผลต่อค่าความร้อน ซึ่งมหาสารชัยจะมีค่าความร้อนเท่ากับ 12.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และน้ำมันชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น โดยน้ำมันชีวภาพที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 19.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโตไลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 19.26 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาสารชัยกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากแหล่งอื่น โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแต่สามารถอธิบายเบื้องต้นได้ว่า ปริมาณคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาสารชัยจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ แต่มีค่าต่ำกว่าน้ำมันหนักจากแหล่งปิโตรเลียมอย่างมาก จึงส่งผลต่อค่าความร้อนที่เกิดซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4.8 โดยค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาสารชัยจะอยู่ในช่วง 19.26 ถึง 19.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้อยู่ในช่วง 19.20 ถึง 26.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และน้ำมันหนักจากแหล่งปิโตรเลียมประมาณ 42.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

4.6.2 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพจากมหาหุ่ย

ตารางที่ 4.9 สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพจากมหาหุ่ย

สมบัติทางกายภาพ ของน้ำมันชีวภาพ	มหาหุ่ยที่ไม่มีการเติม ตัวเร่งปฏิกิริยา	มหาหุ่ยที่มีการเติมตัวเร่ง ปฏิกิริยา	จุลสาหุ่ย (ศรีสุขต์, 2558)	ซีลี้อยูคา ลิปต์ส (ศิวัช ภูระหงษ์ , 2557)	ทะเลาปาล์ม (พีรพล เรือง วิไลรัตน์, 2554)
ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1042	1031	1119	1097	1058
ความหนืด 40 องศาเซลเซียส (เซนติ สโตรก)	N/A	N/A	3.9	0.79	0.76
ซีเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	-	0.51	5.63	11.86
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	-	0.013	5.6	N/A
ค่าความเป็นกรดเบส (มิลลิกรัม โพแทสเซียมออกไซด์ต่อกรัม)	52.84	88.17	46.78	1.91	N/A

หมายเหตุ : N/A ไม่สามารถวัดค่าได้

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพจากมหาหุ่ยเทียบกับชีวมวลต่างๆ อาทิเช่น จุลสาหุ่ย [43] ซีลี้อยูคา ลิปต์ส [44] และ ทะเลาปาล์ม [45] เป็นต้น โดยทำการวัดค่าความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ 15 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรดเบส (มิลลิกรัมโพแทสเซียมออกไซด์ต่อกรัมของน้ำมัน)

4.6.2.1 ค่าความหนืดและความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพจากมหาหุราย

จากการวิเคราะห์ความหนืดความหนาแน่นของมหาหุราย พบว่ามีค่าความหนาแน่นของมหาหุรายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 1042 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมหาหุรายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 1031 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากผลค่าความหนาแน่นของมหาหุรายทั้งที่มีการเติมและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยังมีค่าความหนาแน่นที่น้อยกว่าชีวมวลอื่นอยู่เพียงเล็กน้อย โดยจุลสาหุรายมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 1119 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้อยกว่าชีวมวลอื่นอยู่ที่ 1097 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และทะเลสาหุรายมีค่าอยู่ที่ 1058 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

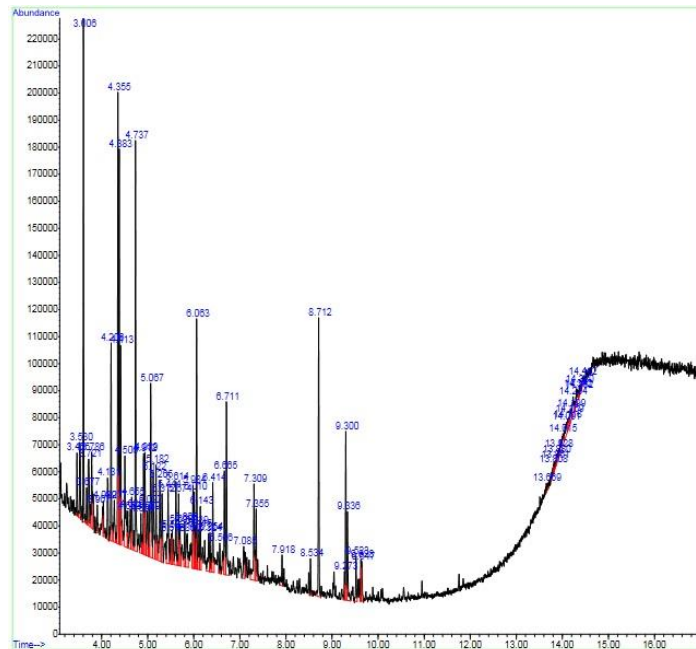
4.6.2.2 ค่าความเป็นกรดเบสของน้ำมันชีวภาพจากมหาหุราย

จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเบสของน้ำมันชีวภาพจากมหาหุราย พบว่าค่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาหุรายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความเป็นกรดสูง โดยมีค่าเท่ากับ 52.84 มิลลิกรัมโพแทสเซียมออกไซด์ต่อกรัม เนื่องจากในน้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาหุรายองค์ประกอบของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) จึงทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาหุรายมีค่าความเป็นกรดที่สูงนั่นเอง ในส่วนน้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาหุรายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดีโกลไมต์ไม่ส่งเสริมในการลดค่าความเป็นกรดลง โดยน้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาหุรายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่าความเป็นกรดอยู่ที่ 88.17 มิลลิกรัมโพแทสเซียมออกไซด์ต่อกรัม อาจเป็นผลมาจากการแตกตัวทางความร้อนของสารไฮโดรคาร์บอนระหว่างการไพโรไลซิสผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาดีโกลไมต์จึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าความเป็นกรดสูง [46] ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS)

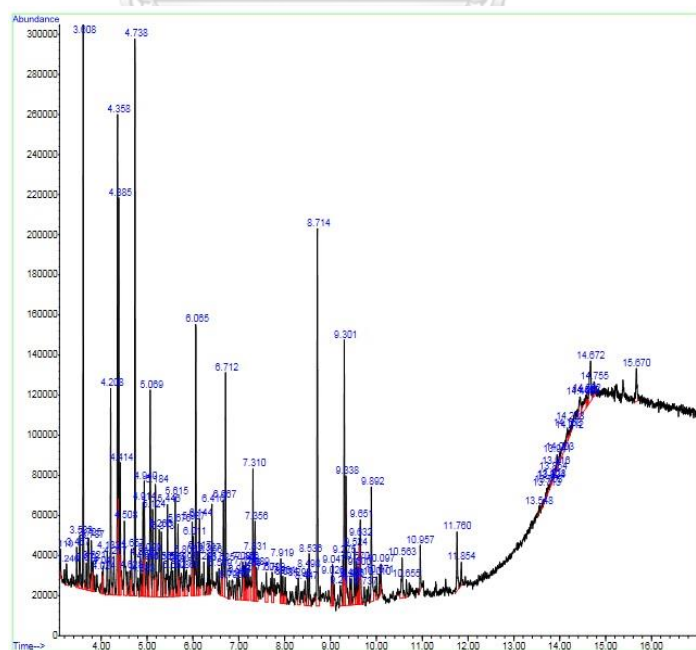
4.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสมหาหุรายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสมหาหุรายนั้น จะศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพและผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Distillation Gas Chromatography, DGC)

4.7.1 ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากมหาหุ่ยด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
ร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์



รูปที่ 4.10 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาหุ่ยที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์



รูปที่ 4.11 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาหุ่ยที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสสมหสหารายที่ไม่มี การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคลโคไลต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและองค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสสมหสหาราย ซึ่งพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสสมหสหารายเต็มไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ซับซ้อน โดยประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์มากมาย เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอะโรมาติก สารประกอบไนโตรเจน และสารประกอบออกซิเจน ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและไม่มี การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยผ่านเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตร

ประเภท	ปริมาณ (ร้อยละเปอร์เซ็นต์)	
	ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
ไฮโดรคาร์บอน	26.32	19.83
แอลเคน	11.84	12.07
แอลคีน	14.47	6.90
แอลโคไน์	0.00	0.86
สารประกอบอะโรมาติก	31.58	25.00
เบนซีน	9.21	7.76
ฟีนอล	10.53	6.90
แอลกอฮอล์	6.58	4.31
แนฟทาลีน	1.32	0.86
อินดีน	3.95	5.17
สารประกอบไนโตรเจน	10.53	20.69

ประเภท	ปริมาณ (ร้อยละเปอร์เซ็นต์)	
	ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
เอมีน	2.63	2.59
เอมาย	1.32	5.17
ไนไตรล	3.95	3.45
อินโดล	2.63	5.17
ไพรีดีน	0.00	4.31
สารประกอบออกซิเจน	21.05	19.83
คีโตน	10.53	7.76
เอซิด	9.21	12.07
อัลดีไฮด์	1.32	0.00
อื่นๆ	10.53	14.66
รวม	100	100

จากตารางที่ 4.10 แสดงองค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ พบว่าองค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหุ่ยทั้งที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอะโรมาติก สารประกอบไนโตรเจน สารประกอบออกซิเจน และสารประกอบอื่นๆ โดยองค์ประกอบหลักของไฮโดรคาร์บอน คือ แอลคีน และแอลเคน องค์ประกอบหลักของสารประกอบอะโรมาติก คือ ฟีนอล และเบนซีน องค์ประกอบหลักของสารประกอบไนโตรเจน คือ เอมีน เอมาย ไนไตรล และอินโดล และองค์ประกอบหลักของออกซิเจน คือ คีโตน และเอซิด

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดโลไมต์พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะพบว่าองค์ประกอบหลักในน้ำมันชีวมวลที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พารา-ครีซอล (p-Cresol) จึงทำให้หมู่ไฮดรอกซิลนั้นมีค่าสูง ในทางกลับกันน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก คือ ไพเพอริดีโนน (4-Piperidinone) เป็นหมู่ของอะมิโน จึงทำให้หมู่ฟังก์ชันในกลุ่มของสารประกอบไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

4.7.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สจากการไพโรไลซิสสมหสาหร่ายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

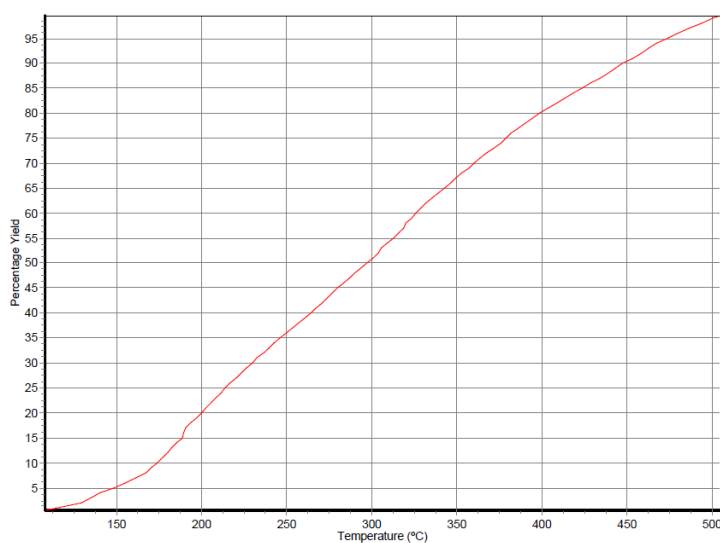
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สจากการไพโรไลซิสสมหสาหร่าย

องค์ประกอบ	ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละเปอร์เซ็นต์)	
	ไม่มีเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	มีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
มีเทน	56	55
อีเทน	15	15
เอทิลีน	14	16
โพรเพน	5	5
อะเซติลีน	3	4
ทราน-2-บิวทีน	3	3
1-บิวทีน	-	1
n-เพนเทน	3	-
ทราน-2-เพนทีน	1	1
รวม	100	100

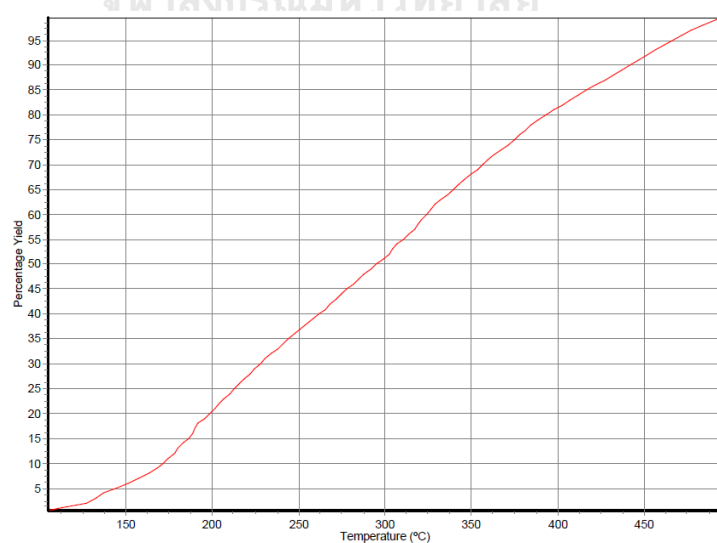
จากตารางที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สจากการไพโรไลซิสสมหสาหร่ายทั้งที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ พบว่าองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสสมหสาหร่าย คือ แก๊สมีเทน (Methane) โดยมีปริมาณร้อยละสูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีแก๊สอื่นอีกในปริมาณเล็กน้อย เช่น อีเทน (Ethane) และเอทิลีน (Ethylene) เป็นต้น ในส่วนการเปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าองค์ประกอบหลักมีความใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณของแก๊สที่ได้จากการ

ไพโรไลซิสสมหสหาร่ายโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะมีปริมาณแก๊สที่มากกว่าสมหสหาร่ายที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ ซึ่งดูได้จากผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 4.8

4.7.3 ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากสมหสหาร่ายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น



รูปที่ 4.12 โครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่นน้ำมันชีวภาพจากสมหสหาร่ายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์



รูปที่ 4.13 โครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่นน้ำมันชีวภาพจากสมหสหาร่ายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงผลโครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่นน้ำมันชีวภาพจากมหาหุรายที่มีการไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบคาร์บอนตามจุดเดือดของน้ำมันชีวภาพจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยเปอร์เซ็นต์)	
	ไม่มีเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	มีตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
แก๊สโซลีน	20	20
เคโรซีน	16	19
ไลท์แก๊สออยด์	32	31
แก๊สออยด์	5	4
น้ำมันหนัก	27	26

จากตารางที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบคาร์บอนตามจุดเดือดของน้ำมันชีวมวลที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ พบว่าทั้งการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีผลที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยน้ำองค์ประกอบมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหุรายจะประกอบไปด้วย แก๊สโซลีน (Gasoline) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เคโรซีน (Kerosene) ร้อยละ 16 ถึง 19 โดยน้ำหนัก ไลท์แก๊สออยด์ (Light gas oil) ร้อยละ 31 ถึง 32 โดยน้ำหนัก แก๊สออยด์ (Gas oil) ร้อยละ 4 ถึง 5 โดยน้ำหนัก และน้ำมันหนัก (Long residue hydrocarbon) ร้อยละ 26 ถึง 27 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์จะส่งเสริมทำให้เกิดการแตกตัวจากไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่สลายตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง จากน้ำมันหนัก แก๊สออยด์ และไลท์แก๊สออยด์ กลายเป็นเคโรซีน ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่กล่าวว่า แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์จะส่งเสริมให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ให้มีไฮโดรคาร์บอนอยู่ในช่วงอะตอม 8 ถึง 12 อะตอม [36, 37] นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าคาร์บอนหลักของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหุรายทั้งที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ จะอยู่ในช่วงไลท์แก๊สออยด์ (Light gas oil)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงเหลวผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของ *Ceratophyllum demersum* L. โดยใช้โดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของมหาหุรัย

จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของมหาหุรัย พบว่ามีการสลายตัวสูงสุดของมหาหุรัยอยู่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส โดยสามารถแบ่งการสลายตัวออกเป็น 3 ช่วงใหญ่ ได้แก่ ช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้น ช่วงที่สองเป็นการสลายตัวสารระเหย และช่วงที่สามเป็นการสลายตัวของคาร์บอนหนัก ซึ่งอุณหภูมิที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์อยู่ระหว่างช่วง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสมหาหุรัย

5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของมหาหุรัย

จากการศึกษาสมบัติพื้นฐานของมหาหุรัย ในส่วนของการวิเคราะห์แบบประมาณประกอบไปด้วยความชื้น (Moisture) ร้อยละ 5.46 โดยน้ำหนัก สารระเหย (Volatiles) ร้อยละ 34.22 โดยน้ำหนัก ซี้เถ้า (Ash) ร้อยละ 29.50 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ร้อยละ 30.82 โดยน้ำหนัก และในส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุประกอบไปด้วยคาร์บอน (Carbon) ร้อยละ 32.94 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจน (Hydrogen) ร้อยละ 4.29 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจน (Nitrogen) ร้อยละ 3.45 โดยน้ำหนัก และออกซิเจน (Oxygen) ร้อยละ 59.32 โดยน้ำหนัก โดยค่าความร้อนของมหาหุรัยมีค่าเท่ากับ 19.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

5.1.3 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของมหาหุรัยในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของมหาหุรัยในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จะได้ภาวะที่เหมาะสมคือ คือ อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 250 ถึง 500 ไมครอน อัตราการป้อนของสารตั้งต้น 1.13 กิโลกรัม

ต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงถึงร้อยละ 41.87 โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเท่ากับ 12.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

5.1.4 ศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์ สามารถสรุปได้ว่าปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหว่ายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์จะให้ปริมาณที่มากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหว่ายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์ในทุกอัตราส่วน แต่การไพโรไลซิสมหาหว่ายที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้น

5.1.5 ศึกษาผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสมหาหว่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของน้ำมันเบาต่อน้ำมันหนักของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหว่ายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 69.35 ต่อ 30.64 เปอร์เซ็นต์ และที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 72.57 ต่อ 27.43 เปอร์เซ็นต์ และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพได้จากการไพโรไลซิสมหาหว่ายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าน้ำมันชีวภาพมีคาร์บอนอะตอมที่มากกว่าเมื่อเทียบกับมหาหว่าย ส่งผลให้มีค่าความร้อนที่สูงกว่า โดยน้ำมันชีวภาพได้จากการไพโรไลซิสมหาหว่ายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความร้อน 19.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม มีนชีวมวลได้จากการไพโรไลซิสมหาหว่ายที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความร้อน 19.26 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมหาหว่ายมีค่าความร้อน 12.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาหว่ายกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้และน้ำมันหนักจากแหล่งปิโตรเลียม พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากมหาหว่ายมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ แต่จะมีค่าต่ำกว่าน้ำมันหนักจากแหล่งปิโตรเลียม

จากการศึกษาความหนืดและความหนาแน่น รวมถึงค่าความเป็นกรดเบส พบว่าน้ำมันชีวภาพมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับชีวมวลอื่นๆ โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงที่ 1031 ถึง 1042 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความเป็นกรดที่สูง โดยมีค่าอยู่ที่ 52.84 ถึง 88.17 มิลลิกรัมโพแทสเซียมออกไซด์ต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าชีวมวลชนิดอื่นๆ เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพมีหมู่คาร์บอกซิลในปริมาณมาก

5.1.6 ศึกษาผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสมหาสารายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีจะถูกทดสอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Distillation Gas Chromatography, DGC)

5.1.6.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น แอลเคนและแอลคีน สารประกอบอะโรมาติก เช่น เบนซีนและฟีนอล และสารประกอบออกซิเจน เช่น คีโตน และกรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น โดยสารประกอบอินทรีย์จำพวกอะโรมาติกจะมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 25.00 ถึง 31.58 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าองค์ประกอบหลักในน้ำมันชีวภาพที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พารา-ครีซอล (p-Cresol) และน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก คือ ไพเพอริดีโนน (4-Piperidinone)

5.1.6.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีแก๊สที่เป็นผลิตภัณฑ์หลัก คือ แก๊สมีเทน (Methane) โดยมีปริมาณร้อยละสูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์

5.1.6.3 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น

จากการวิเคราะห์คาบจุดเดือดของน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าทั้งการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีผลแตกต่างกันเล็กน้อย โดยน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาสารายจะประกอบไปด้วยแก๊สโซลีน (Gasoline) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เคโรซีน (Kerosene) ร้อยละ 16 ถึง 19 โดยน้ำหนัก ไลท์แก๊สออยด์ (Light gas oil) ร้อยละ 31 ถึง 32 โดยน้ำหนัก แก๊สออยด์ (Gas oil) ร้อยละ 4 ถึง 5 โดยน้ำหนัก และน้ำมันหนัก (Long residue hydrocarbon) ร้อยละ 26 ถึง 27 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องในส่วนของคุณดักเก็บถ่านชาร์ พบว่ามีปริมาณน้ำมันชีวมวลบางส่วนติดอยู่กับชุดดักเก็บถ่านชาร์ ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิที่ดักเก็บถ่านชาร์มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง เมื่อสารระเหยออกจากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดการเกาะติดกับชุดดักเก็บถ่านชาร์ จึงต้องทำให้ชุดดักเก็บถ่านชาร์มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์ก่อน เพื่อลดปริมาณการเกาะติดของน้ำมันชีวภาพกับตัวดักเก็บ
- น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความเป็นกรดและมีปริมาณออกซิเจนสูง จึงต้องทำการปรับภาวะค่าความเป็นกรดและลดปริมาณออกซิเจนก่อนนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง
- ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความร้อนในระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้ โดยก่อนนำไปใช้งานควรอัดเป็นก้อนและผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานและง่ายต่อการเก็บรักษา
- แก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสนั้นอาจจะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากในมหาหรัยมีปริมาณของธาตุไนโตรเจนค่อนข้างสูง จึงต้องมีชุดดักเก็บแก๊สหรือชุดกำจัดมลพิษก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ
- ตัวเร่งปฏิกิริยาดีโกลไมต์พบว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาต้นทุนที่ต่ำ และสามารถลดปริมาณน้ำมันดินที่เกิดขึ้นได้ แต่พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดีโกลไมต์จะลดปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวลง จึงควรค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติมในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา
- หากมีการใช้ดีโกลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ควรเพิ่มชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติม เนื่องจาก การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาดีโกลไมต์กับชีวมวลที่เป็นของแข็งจะเกิดแรงอันตรายที่ต่ำ ทำให้เกิดการผสมได้ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง
- จากงานวิจัยข้างต้นสามารถต่อยอดและหาแนวทางที่สามารถขยายไปในเชิงพาณิชย์ได้ เนื่องจากต้นทุนของมหาหรัยมีต้นทุนที่ต่ำ และมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จึงเหมาะสมที่จะนำไปค้นคว้าเพิ่มเติมและนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคตได้



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์องค์ประกอบของมหาสารายและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาสาราย

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณเป็นการแยกองค์ประกอบอย่างง่าย ด้วยสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ น้ำหรือความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

1.1 การวิเคราะห์น้ำหรือความชื้น

วิธีการวิเคราะห์ความชื้น ในอดีตจะใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน (Standard test method for moisture in the analysis sample pf coal and coke: ASTM D3173) แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนาใช้เครื่องมือวิเคราะห์ซึ่งสามารถให้ค่าความชื้นออกมาได้ทันที

1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าด้วยมาตรฐาน (Standard test method for ash in the analysis sample pf coal and coke: ASTM D3174) โดยเถ้าที่หลงเหลือจะแสดงส่วนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในมหาสาราย โดยเราจะทำการเผามหาสารายที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง ส่วนของสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้จนหมด เหลือเฉพาะส่วนของสารอินทรีย์ที่ไม่ถูกเผาไหม้

อุปกรณ์

1. เตาเผาอุณหภูมิสูง
2. ถ้วยครุชชีเบล
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ทำการเผาครุชชีเบลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น พร้อมกับชั่งน้ำหนักถ้วยครุชชีเบลแล้วบันทึกค่าก่อนการเผา
2. ชั่งน้ำหนักที่มีมหาสารายแห้งใส่ถ้วยครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม พร้อมบันทึกน้ำหนักขณะชั่ง

3. ใส่ถั่วครุชชีเบลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
4. นำถั่วครุชชีเบลออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็น และนำไปใส่โถดูดความชื้นพร้อมกับชั่งน้ำหนักหลังการเผา

การคำนวณ

$$\text{Ash} = (W_1 \times W_2) / W \times 100$$

โดย Ash คือ ร้อยละของปริมาณถั่ว

W_1 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักถั่ว (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิด (กรัม)

W คือ น้ำหนักของมหาสารรายแห้ง (กรัม)

1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยด้วยมาตรฐาน (Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke: ASTM D3175) โดยสารระเหยจะแสดงส่วนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในมหาสารราย โดยเราจะทำการเผามหาสารรายที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที ในเตาเผาแบบท่อ (Tubular furnace)

อุปกรณ์

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ถั่วครุชชีเบล
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักมหาสารรายแห้งใส่ถั่วครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม พร้อมบันทึกค่าของน้ำหนักมหาสารรายและปิดฝาถั่วครุชชีเบล
2. ใช้ที่คีบเหล็กสำหรับคีบถั่วครุชชีเบล เพื่อจุ่มลงในเตาเผาแบบท่อ โดยจะให้อยู่เหนือปากเตาเผาแบบท่อ เป็นเวลา 2 นาที ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส
3. หย่อนถั่วครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตาเผาแบบท่อ ระวังอย่าให้ถั่วครุชชีเบลตกลงไปในเตาเผาแบบท่อ เป็นเวลา 3 นาที ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส

4. หย่อนถ้วยครุชชีเปลือให้ยู่บริเวณกึ่งกลางเตาเผาแบบท่อ ระวังอย่าให้ถ้วยครุชชีเปลือตกลงไปในเตาเผาแบบท่อ เป็นเวลา 7 นาที ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส
5. นำถ้วยครุชชีเปลือออกมาทิ้งไว้ในเย็นประมาณ 15 นาที แล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้น ก่อนจะนำไปชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

การคำนวณ

$$\text{Volatile matter} = (W_3 \times W_4) / W \times 100$$

โดย Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

W_3 คือ น้ำหนักของครุชชีเปลือรวมกับน้ำหนักมหาหรร่ายก่อนเผา (กรัม)

W_4 คือ น้ำหนักของครุชชีเปลือพร้อมฝาปิดกับน้ำหนักมหาหรร่ายหลังเผา (กรัม)

W คือ น้ำหนักของมหาหรร่ายแห้ง (กรัม)

1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัวจะอาศัยผลต่างขององค์ประกอบความชื้น เถ้า และสารระเหย

การคำนวณ

$$\text{Fixed carbon} = 100 - \text{Moisture} - \text{Ash} - \text{Volatile matter}$$

โดย Fixed carbon คือ ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว

Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

2. การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาหุ่ย

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาหุ่ยด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ก-1 ก-2 ก-3 และ ก-4

ตารางที่ ก-1 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ (องศาเซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
	400	33.25	32.83	24.82	24.32	41.93	42.85	33.04	24.57
450	33.96	32.50	27.46	25.00	38.58	42.50	33.23	26.23	40.54
500	34.98	35.04	26.39	27.56	38.63	37.40	35.01	26.98	38.02
550	40.12	37.60	28.81	26.65	31.07	35.75	38.86	27.73	33.41
600	33.65	37.13	34.68	32.32	31.67	30.55	35.39	33.50	31.11

ตารางที่ ก-2 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
	ต่ำกว่า 250	35.43	30.62	33.37	36.11	31.20	33.27	33.03	34.74
250-500	40.12	37.60	28.81	26.65	31.07	35.75	38.86	27.73	33.41
500-850	33.38	33.92	21.76	24.60	44.86	41.48	33.65	23.18	43.17

ตารางที่ ก-3 ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

อัตราการ ป้อนชีวมวล (กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง)	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
0.41	34.69	34.51	28.20	28.48	37.11	37.01	34.60	28.34	37.06
0.61	35.02	37.17	24.26	24.40	40.72	38.43	36.10	24.33	39.58
1.13	37.10	37.14	24.2	22.65	38.70	40.21	37.12	23.43	39.46
2.91	37.02	35.09	23.13	22.98	39.85	41.99	36.06	23.06	40.92
3.30	35.99	36.26	19.80	23.10	44.21	40.64	36.13	21.45	42.43

ตารางที่ ก-4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

อัตราการ ไหลของแก๊ส ไนโตรเจน (มิลลิเมตรต่อ นาทีก)	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
40	36.87	37.73	26.98	26.45	36.15	35.82	37.30	26.72	35.99
80	38.72	38.17	22.55	28.68	38.73	33.15	38.45	25.62	35.94
120	41.63	37.02	26.06	23.13	32.31	39.85	39.33	24.60	36.08
160	41.87	40.44	20.78	21.01	37.35	38.55	41.16	20.90	37.95
200	38.76	38.90	22.66	20.42	38.58	40.68	38.83	21.54	39.63

3. การศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีไมต์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสสมหสาหร่ายด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

ปริมาณ ตัวเร่ง	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
0	41.87	40.44	20.78	21.01	37.35	38.55	41.16	20.90	37.95
5	35.33	37.82	26.05	18.61	38.62	43.57	36.58	22.33	41.10
10	30.07	29.01	28.43	29.19	41.5	41.8	29.54	28.81	41.65
20	23.5	24.2	31.81	30.44	44.69	45.36	23.85	31.13	45.03

4. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสสมหสาหร่ายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์

4.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิควิเคราะห์ที่ใช้โครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคที่มีความนิยมและกว้างขวาง เพราะสามารถแยกสารตัวอย่างที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนและหลากหลายได้ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วและแม่นยำต่อการวิเคราะห์ โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี สามารถแบ่งเป็น 2 วิธีการ คือ การใช้เฟสอยู่กับที่ที่เป็นของแข็ง เรียกว่า “gas-solid chromatography” (GSC) และ การใช้เฟสอยู่กับที่ที่เป็นของเหลว เรียกว่า “gas-liquid chromatography” (GLC) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีเฟสเคลื่อนที่ที่เป็นแก๊ส นอกจากนี้แก๊สโครมาโทกราฟี ใช้ได้กับสารที่สามารถเกิดการระเหยกลายเป็นไอได้ ณ อุณหภูมิของคอลัมน์เท่านั้น จึงทำให้แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้แยกสารประกอบทางเคมีหรือสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น และแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. แก๊สที่ใช้ทำงานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มี 3 ชนิด คือ
 - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สตัวพา (Carrier Gases) เพื่อจะใช้พาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์
 - 1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)
 - 1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID
2. ตัวระบายแก๊ส (Gas Traps) และฟิลเตอร์ (Filters) เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบปลอกกระสุน (Cartridge) คือ
 - 2.1 ตัวระบายคัดขนาดโมเลกุล (Molecular Sieve Trap) ใช้ดูดความชื้น
 - 2.2 ตัวระบายออกซิเจน (Oxygen Trap) เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน
 - 2.3 ฟิลเตอร์ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Filter) ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมันสำหรับแก๊สตัวพาควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter
3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา
4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ
5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มิลลิเมตร อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการแยก สารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพนอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดรูเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้
 - 5.1 คอลัมน์ของเฟสหยุดนิ่ง Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลว เคลือบเป็นฟิล์ม บางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร
 - 5.2 คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับหรือเมทริกซ์ บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร
 - 5.3 คอลัมน์ขนาดเล็ก (Micropacked Column) คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร
6. ตัวตรวจวัดเอฟไอดี Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมีขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นตัวตรวจวัดชนิด FID นี้เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด

4.2 แก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS)

แก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่มีการต่อเครื่องแมสสเปคโตรมิเตอร์ร่วมด้วย เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยให้ผลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แม่นยำกว่าแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งในแมสสเปคโตรมิเตอร์จะมีฐานข้อมูล (Library) เพื่อความถูกต้องโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารมาตรฐานเข้ามาเปรียบเทียบ ถือเป็นข้อดีของเทคนิค

หลักการทำงานจะแบ่งเป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนของแก๊สโครมาโทกราฟีทำหน้าที่แยกองค์ประกอบของสารผสม โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของสารแต่ละชนิดบนเฟสคงที่ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่เดียวกัน ส่วนของแมสสเปคโตรมิเตอร์จะได้รับสารประกอบเชิงเดี่ยวจากส่วนของแก๊สโครมาโทกราฟี และทำการกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปของประจุ เรียกว่า ไอออนโมเลกุลาร์ (Molecular ion: M^+ or M^-)

จากการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาหรัยทั้งที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา และมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ค-1 และ ค-2

ตารางที่ ค-1 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสมหาหรัยทั้งที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมด์

ลำดับ	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.464	0.81	Benzene, propyl-	Aromatic (Benzenes)
2	3.529	1.54	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	Aromatic (Benzenes)
3	3.67	5.77	Phenol	Aromatic

				(Phenol)
4	3.676	0.51	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	Aromatic (Benzenes)
5	3.720	1.76	1-Decene	Hydrocarbons (Alkenes)
6	3.785	1.44	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	Aromatic (Benzenes)
7	3.906	0.38	Hexadecane, 2,6,11,15-tetramethyl-	Hydrocarbons (Alkanes)
8	4.041	0.42	Benzene, 2-propenyl-	Aromatic (Benzenes)
9	4.132	1.19	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	Oxygenic (Ketone)
10	4.205	2.45	Phenol, 3-methyl-	Aromatic (Phenol)
11	4.275	0.84	Tetracyclo[3.3.1.1(3,7).0(2,4)]decane	Hydrocarbons (Alkanes)
12	4.357	6.14	p-Cresol	Aromatic (Alcohol)
13	4.383	5.17	2-Piperidinecarboxylic acid, 1-acetyl-, ethyl ester	Oxygenic (Acids)
14	4.413	2.90	3a,4,5,6,7,7a-Hexahydro-4,7-	Hydrocarbons

			methanoindene	(Alkenes)
15	4.504	2.16	1-Undecene	Hydrocarbons (Alkenes)
16	4.569	0.50	Undecane	Hydrocarbons (Alkenes)
17	4.626	0.93	2-(1-Cyclohexenyl)ethylamine	Nitrogenous (Amines)
18	4.656	1.03	Phenol, 2,6-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
19	4.739	5.38	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	Oxygenic (Ketone)
20	4.856	0.67	Phenol, 3,5-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
21	4.912	1.58	Benzyl nitrile	Nitrogenous (Nitriles)
22	4.938	1.81	Phenol, 3,5-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
23	4.990	0.91	9-Methyltricyclo[4.2.1.1(2,5)]dec-3-en-9-ol	Aromatic (Alcohol)
24	5.029	0.86	1H-Indene, 1-methyl-	Aromatic (Indenes)
25	5.068	3.38	Phenol, 4-ethyl-	Aromatic

				(Phenol)
26	5.120	1.77	Cyclooctanone	Oxygenic (Ketone)
27	5.181	1.37	6-Hydroxy-4,4,6-trimethyltetrahydro-1,3-thiazin-2-thione	Oxygenic (Ketone)
28	5.263	1.70	1-Dodecene	Hydrocarbons (Alkenes)
29	5.311	1.47	Naphthalene	Aromatic (Naphthalenes)
30	5.445	1.70	Benzofuran, 2,3-dihydro-	Aromatic (Benzenes)
31	5.515	0.54	1H-Benzimidazole, 5,6-dimethyl-	Aromatic (Benzenes)
32	5.532	0.43	Phenol, 2,3,6-trimethyl-	Aromatic (Phenol)
33	5.614	1.47	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	Aromatic (Phenol)
34	5.675	1.00	Benzenepropanenitrile	Nitrogenous (Nitriles)
35	5.697	0.87	2-Propenenitrile, 3-phenyl-, (E)-	Nitrogenous (Nitriles)
36	5.8005	0.77	1-Naphthalenol, 1,2,3,4-tetrahydro-3-methyl-	Aromatic

				(Alcohol)
37	5.861	1.08	3-Methylbenzyl alcohol, methyl ether	Aromatic (Alcohol)
38	5.983	1.50	1-Tridecene	Hydrocarbons (Alkenes)
39	6.009	1.00	trans-7-Methyl-3-octene	Hydrocarbons (Alkenes)
40	6.039	0.52	Tridecane	Hydrocarbons (Alkanes)
41	6.065	3.24	Indole	Nitrogenous (Indoles)
42	6.113	0.76	Naphthalene, 2-methyl-	Aromatic (Naphthalenes)
43	6.143	0.97	1,3-Cyclopentanedione, 2,4-dimethyl-	Oxygenic (Ketone)
44	6.325	0.84	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	Oxygenic (Ketone)
45	6.356	0.62	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	Oxygenic (Ketone)
46	6.416	1.48	Cyclooctane, 1,2-dimethyl-	Hydrocarbons (Alkanes)

47	6.564	0.41	Dodecane, 4,6-dimethyl-	Hydrocarbons (Alkanes)
48	6.663	1.67	1-Tetradecene	Hydrocarbons (Alkenes)
49	6.711	2.97	1H-Indole, 4-methyl-	Nitrogenous (Indoles)
50	7.084	0.78	4-Fluoro-1-methyl-5-carboxylic acid, ethyl(ester)	Oxygenic (Acids)
51	7.309	1.85	Cyclopentadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
52	7.353	1.05	Pentadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
53	7.916	0.57	Trifluoroacetic acid,n-tridecyl ester	Oxygenic (Acids)
54	8.536	0.49	2-methyltetracosane	Hydrocarbons (Alkanes)
55	8.710	4.03	3-Nonene, (E)-	Hydrocarbons (Alkenes)
56	9.273	0.40	Heptanal	Oxygenic (Aldehydes)
57	9.299	2.37	Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-	Hydrocarbons

			trimethyl-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-	(Alkanes)
58	9.334	1.69	2-Hexadecene, 3,7,11,15- tetramethyl-, [R-[R*,R*-(E)]]-	Hydrocarbons (Alkenes)
59	9.525	0.73	3,7,11,15-Tetramethyl-2- hexadecen-1-ol	Aromatic (Alcohol)
60	9.629	0.63	Z-11(13-Methyl)tetradecen-1-ol acetate	Oxygenic (Acids)
61	9.646	0.74	1,2-Dioctylcyclopropene	Hydrocarbons (Alkenes)
62	13.669	0.10	Tris(tert- butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
63	13.808	0.22	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Oxygenic (Acids)
64	13.851	0.20	N-Methyl-1-adamantaneacetamide	Nitrogenous (Amides)
65	13.882	0.13	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	Nitrogenous (Amines)
66	13.929	0.19	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
67	14.016	0.62	Methyltris(trimethylsiloxy)silane	Other
68	14.090	0.52	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
69	14.120	0.11	Tris(tert- butyldimethylsilyloxy)arsane	Other

70	14.159	0.31	2,4,6-Cycloheptatrien-1-one, 3,5-bis-trimethylsilyl-	Oxygenic (Ketone)
71	14.195	0.35	Arsenous acid, tris(trimethylsilyl) ester	Oxygenic (Acids)
72	14.233	0.48	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
73	14.341	0.54	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Oxygenic (Acids)
74	14.363	0.07	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
75	14.380	0.07	2-(Acetoxymethyl)-3-(methoxycarbonyl)biphenylene	Aromatic (Naphthalenes)
76	14.441	0.12	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other

ตารางที่ ค-2 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสสมหสำหรับมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ลำดับ	เวลา (นาที)	พื้นที่ พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.108	0.20	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	Oxygenic (Ketone)
2	3.247	0.36	Pyridine, 3,5-dimethyl-	Nitrogenous

				(Pyridines)
3	3.468	0.38	Benzene, propyl-	Aromatic (Benzenes)
4	3.533	0.83	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	Oxygenic (Ketone)
5	3.607	4.46	Phenol	Aromatic (Phenol)
6	3.676	0.29	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	Aromatic (Benzenes)
7	3.724	1.09	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	Nitrogenous (Pyridines)
8	3.789	0.73	5-Methyl-6-phenyltetrahydro-1,3-oxazine-2-thione	Other
9	3.819	3.34	Benzofuran	Aromatic (Benzenes)
10	4.023	0.26	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	Aromatic (Benzenes)
11	4.040	0.27	Benzene, 1-propenyl-	Aromatic (Benzenes)
12	4.132	0.66	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	Oxygenic (Ketone)
13	4.210	1.97	Phenol, 2-methyl-	Oxygenic (Ketone)

14	4.279	0.61	Tetracyclo[3.3.1.1(3,7).0(2,4)]decane	Hydrocarbons (Alkanes)
15	4.357	5.12	p-Cresol	Aromatic (Alcohol)
16	4.383	3.62	2-Piperidinecarboxylic acid, 1-acetyl-, ethyl ester	Oxygenic (Acids)
17	4.413	1.42	3a,4,5,6,7,7a-Hexahydro-4,7-methanoindene	Aromatic (Indenes)
18	4.509	1.38	E-11,13-Tetradecadien-1-ol	Aromatic (Alcohol)
19	4.630	0.43	Pyrazine, 2-methoxy-3-methyl-	Nitrogenous (Pyridines)
20	4.656	0.74	Phenol, 2,6-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
21	4.738	5.66	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	Oxygenic (Ketone)
22	4.856	0.48	Phenol, 2-ethyl-	Aromatic (Phenol)
23	4.882	0.23	1H-Pyrrole-2-carbonitrile	Nitrogenous (Nitriles)
24	4.912	1.02	Benzyl nitrile	Nitrogenous

				(Nitriles)
25	4.938	1.44	Phenol, 2,4-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
26	4.990	0.55	9-Methyltricyclo[4.2.1.1(2,5)]dec-3-en-9-ol	Aromatic (Phenol)
27	5.029	0.55	Benzene, 1-butynyl-	Aromatic (Benzenes)
28	5.068	2.85	Phenol, 4-ethyl-	Aromatic (Phenol)
29	5.124	1.13	3(2H)-Pyridazinone, 6-hydroxy-2-(.beta.-hydroxyphenethyl)-	Oxygenic (Ketone)
30	5.185	1.32	1-(2-Hydroxy-3-methoxy-3-phenylpropyl)piperazine	Other
31	5.267	1.25	Cyclododecane	Hydrocarbons (Alkanes)
32	5.315	0.87	Azulene	Aromatic (Naphthalenes)
33	5.363	0.51	Aziridine, 1-(2-methyl-1-propenyl)-	Nitrogenous (Pyridines)
34	5.445	1.32	Benzofuran, 2,3-dihydro-	Aromatic (Benzenes)
35	5.532	0.68	Phenol, 2-ethyl-6-methyl-	Aromatic (Phenol)

36	5.562	0.33	2-Hexyne	Hydrocarbons (Alkynes)
37	5.614	1.10	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	Aromatic (Phenol)
38	5.675	0.75	Benzenepropanenitrile	Nitrogenous (Nitriles)
39	5.701	0.53	Quinoline	Nitrogenous (Amines)
40	5.805	0.59	1H-Cyclopropa[b]naphthalene, 1a,2,7,7a-tetrahydro-	Aromatic (Naphthalenes)
41	5.861	0.69	3-Methylbenzyl alcohol, methyl ether	Aromatic (Alcohol)
42	5.987	0.99	1-Tridecene	Hydrocarbons (Alkenes)
43	6.013	0.64	5-Tetradecene, (E)-	Hydrocarbons (Alkanes)
44	6.065	3.07	Indole	Nitrogenous (Indoles)
45	6.117	0.55	Benzocycloheptatriene	Aromatic (Naphthalenes)
46	6.143	0.74	3H-Pyrazol-3-one, 2,4-dihydro- 2,4,5-trimethyl-	Oxygenic

				(Ketone)
47	6.243	0.35	Naphthalene, 2-methyl-	Aromatic (Naphthalenes)
48	6.325	0.45	N-(2-Acetylamino)-2-ethylpiperidine	Nitrogenous (Pyridines)
49	6.356	0.41	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	Oxygenic (Ketone)
50	6.416	0.98	4-Heptafluorobutyryloxyhexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
51	6.568	0.27	Nonadecane, 2,3-dimethyl-	Hydrocarbons (Alkanes)
52	6.624	0.46	L-Lysine, N2-acetyl-	Other
53	6.668	1.39	2-Tetradecene, (E)-	Hydrocarbons (Alkenes)
54	6.711	2.67	1H-Indole, 3-methyl-	Nitrogenous (Indoles)
55	6.793	0.19	trans-Cinnamic acid	Oxygenic (Acids)
56	6.962	0.39	1-Phenyl-3-methylpenta-1,2,4-triene	Hydrocarbons (Alkenes)
57	6.993	0.65	Naphthalene, 2,7-dimethyl-	Aromatic

				(Naphthalenes)
58	7.088	0.82	Tricyclo[4.2.1.1(2,5)]decane	Hydrocarbons (Alkanes)
59	7.119	0.42	Undecane	Hydrocarbons (Alkanes)
60	7.158	0.63	2,4,6-Cycloheptatrien-1-one, 2-amino-	Oxygenic (Ketone)
61	7.205	0.59	1-Phenyl-3-methylpenta-1,2,4-triene	Hydrocarbons (Alkenes)
62	7.309	1.59	1-Pentadecene	Hydrocarbons (Alkenes)
63	7.331	0.50	Benzonitrile, 2,4,6-trimethyl-	Nitrogenous (Nitriles)
64	7.357	1.05	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
65	7.387	0.46	Indolizine, 2,7-dimethyl-	Nitrogenous (Indoles)
66	7.600	0.59	Bibenzyl	Aromatic (Benzenes)
67	7.730	0.49	Quinoline, 3-methyl-	Nitrogenous (Amines)

68	7.921	0.50	Trifluoroacetic acid,n-tridecyl ester	Oxygenic (Acids)
69	7.960	0.35	Eicosane, 10-methyl-	Other
70	8.012	0.38	Fluorene	Aromatic (Benzenes)
71	8.298	0.50	1,2,4-Metheno-1H-cyclobuta[cd]pentalene-3,5-dione, hexahydro-	Aromatic (Naphthalenes)
72	8.445	0.32	Benzeneacetamide	Nitrogenous (Amides)
73	8.497	0.50	Cyclotridecane	Hydrocarbons (Alkanes)
74	8.536	0.78	Heptadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
75	8.714	4.42	Cyclopropane, 1-methyl-2-pentyl-	Hydrocarbons (Alkanes)
76	9.026	0.40	L-Aspartic acid, N-glycyl-	Oxygenic (Acids)
77	9.048	0.48	Carbonic acid, octadecyl 2,2,2-trichloroethyl ester	Oxygenic (Acids)
78	9.217	0.46	Comarin, 3,4,4a,5,6,8a-hexahydro-6,8a-epidioxy-4a,6-dimethyl-	Other

79	9.273	0.53	2-Hexadecene, 3,7,11,15-tetramethyl-, [R-[R*,R*-(E)]]-	Hydrocarbons (Alkenes)
80	9.304	2.72	Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-trimethyl-	Hydrocarbons (Alkanes)
81	9.338	2.13	2-Hexadecene, 3,7,11,15-tetramethyl-, [R-[R*,R*-(E)]]-	Hydrocarbons (Alkanes)
82	9.425	0.36	1,1'-Biphenyl, 2-azido-	Other
83	9.455	0.32	Ethyl chrysanthemate	Other
84	9.525	0.80	3,7,11,15-Tetramethyl-2-hexadecen-1-ol	Aromatic (Alcohol)
85	9.568	0.53	Cyclotetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
86	9.598	0.45	Succinic acid, monochloride, 4-methylpent-2-yl ester	Oxygenic (Acids)
87	9.633	0.79	1,11-Tridecadiene	Hydrocarbons (Alkenes)
88	9.650	1.14	1,2-Dioctylcyclopropene	Hydrocarbons (Alkenes)
89	9.737	0.29	N,N-Dimethylacetamide	Nitrogenous (Amides)
90	9.893	1.63	n-Hexadecanoic acid	Oxygenic

				(Acids)
91	10.010	0.28	Cyclopropylcarboxylic acid, 2-fluorophenyl ester	Oxygenic (Acids)
92	10.071	0.27	9H-Pyrido[3,4-b]indole, 1-methyl-	Nitrogenous (Indoles)
93	10.097	0.34	9H-Pyrido[3,4-b]indole	Nitrogenous (Indoles)
94	10.561	0.75	Cyclic octaatomic sulfur	Other
95	10.6556	0.26	Methanesulfonamide, N,N-dimethyl-	Nitrogenous (Amides)
96	10.960	0.49	Octadecanamide	Nitrogenous (Amides)
97	11.762	0.89	9-Octadecenamide, (Z)-	Nitrogenous (Amides)
98	11.853	0.31	9-Octadecenamide, (Z)-	Nitrogenous (Amides)
99	13.548	0.07	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Oxygenic (Acids)
100	13.713	0.14	Arsenous acid, tris(trimethylsilyl) ester	Oxygenic (Acids)
101	13.752	0.12	2-Methyl-7-phenylindole	Nitrogenous

				(Indoles)
102	13.804	0.07	Trimethyl(4-tert-butylphenoxy)silane	Other
103	13.821	0.04	1,2-Benzenediol, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-	Aromatic (Alcohol)
104	13.856	0.06	Tris(tert-butyl(dimethylsilyloxy)arsane	Other
105	13.916	0.13	1H-Indole-2-carboxylic acid, 6-(4-ethoxyphenyl)-3-methyl-4-oxo-4,5,6,7-tetrahydro-, isopropyl ester	Oxygenic (Acids)
106	13.942	0.12	Heptasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13-tetradecamethyl-	Other
107	14.003	0.23	Tris(tert-butyl(dimethylsilyloxy)arsane	Other
108	14.168	0.71	Tris(tert-butyl(dimethylsilyloxy)arsane	Other
109	14.211	0.13	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	Nitrogenous (Amines)
110	14.228	0.15	1H-Indole-2-carboxylic acid, 6-(4-ethoxyphenyl)-3-methyl-4-oxo-4,5,6,7-tetrahydro-, isopropyl ester	Oxygenic (Acids)
111	14.450	0.61	1H-Indole-2-carboxylic acid, 6-(4-ethoxyphenyl)-3-methyl-4-oxo-4,5,6,7-tetrahydro-, isopropyl ester	Oxygenic (Acids)
112	14.562	0.60	1H-Indole-2-carboxylic acid, 6-(4-ethoxyphenyl)-3-methyl-4-oxo-4,5,6,7-tetrahydro-, isopropyl ester	Oxygenic (Acids)

113	14.593	0.15	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
114	14.671	1.13	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
115	14.757	0.17	Tris(tert-butyl(dimethylsilyloxy)arsane	Other
116	15.672	0.69	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other

5. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสสมหสาหร่ายสาหร่ายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น

5.1 แก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Simulation Distillation Gas Chromatography, DGC)

แก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น เป็นวิธีการที่ใช้หลักการของแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้อธิบายลักษณะส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งจำลองการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดของปิโตรเลียม ทำให้สามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็ว โดยตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ด้วยคอลัมน์แก๊สโครมาโทกราฟีแบบไม่มีขั้ว (Non-polar) เพื่อแยกชนิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตามคาบจุดเดือดซึ่งจะสัมพันธ์กับรีเทนชันไทม์ (Retention time) ซึ่งผลที่ออกมาจากพลอตเป็นกราฟและประมวลเป็นแบบจำลองการกลั่น ถือว่าเป็นวิธีที่ถูกลยอมรับกันอย่างกว้างขวางเมื่อเทียบกับการกลั่นแบบดั้งเดิม

การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือดและซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น และวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของแต่ละสาร จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ง-1

ตารางที่ ง-1 องค์ประกอบคาร์บอนตามจุดเดือดของน้ำมันชีวภาพจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น

จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ
IBP - 200	แก๊สโซลีน
200 - 250	เคโรซีน
250 - 350	โลไฟแก๊สออยด์
350 - 370	แก๊สออยด์
370 - FBP	น้ำมันหนัก

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. Verma, M., et al., *Biofuels Production from Biomass by Thermochemical Conversion Technologies*. International Journal of Chemical Engineering, 2012. **2012**: p. 1-18.
2. Suganya, T., et al., *Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **55**: p. 909-941.
3. Alveberg, L.J., *FACTS The norwegian petroleum section*, ed. N.P. Direktoratem. 2013.
4. Shotonwa, I.O., A.O. Giwa-Ajeniya, and G.O. Mekuleyi, *Chapter 3 - The Physical and Chemical Components of Nigerian Crude Oil*, in *The Political Ecology of Oil and Gas Activities in the Nigerian Aquatic Ecosystem*, P.E. Ndimele, Editor. 2018, Academic Press. p. 33-46.
5. Mokhatab, S., W.A. Poe, and J.Y. Mak, *Chapter 1 - Natural Gas Fundamentals*, in *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing (Fourth Edition)*, S. Mokhatab, W.A. Poe, and J.Y. Mak, Editors. 2019, Gulf Professional Publishing. p. 1-35.
6. ศุภวรรธน์ ตันตยานนท์, ปีเตอร์เคมี. 2535, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. Sánchez, J., et al., *Chapter Two - Biomass Resources*, in *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*, C. Lago, N. Caldés, and Y. Lechón, Editors. 2019, Academic Press. p. 25-111.
8. ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. ศักยภาพของชีวมวล. 2549.
9. BeMiller, J.N., *8 - Cellulose and Cellulose-Based Hydrocolloids*, in *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (Third Edition)*, J.N. BeMiller, Editor. 2019, AACC International Press. p. 223-240.
10. Ren, J.-L. and R.-C. Sun, *Chapter 4 - Hemicelluloses*, in *Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels*, R.-C. Sun, Editor. 2010, Elsevier: Amsterdam. p. 73-130.
11. Haghdan, S., S. Rennecker, and G.D. Smith, *1 - Sources of Lignin*, in *Lignin in Polymer Composites*, O. Faruk and M. Sain, Editors. 2016, William Andrew Publishing. p. 1-11.

12. Tanwar, H. and C. George Priya Doss, *Chapter Eight - Computational Resources for Predicting Protein-Protein Interactions*, in *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*, R. Donev, Editor. 2018, Academic Press. p. 251-275.
13. Ashter, S.A., 2 - *Biomass and its sources*, in *Technology and Applications of Polymers Derived from Biomass*, S.A. Ashter, Editor. 2018, William Andrew Publishing. p. 11-36.
14. ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพอด้า, พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้. 2557, กรุงเทพฯ.
15. Liaw, S.-S., et al., *Effect of pyrolysis temperature on the yield and properties of bio-oils obtained from the auger pyrolysis of Douglas Fir wood*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012. **93**: p. 52-62.
16. Guerrero, M., et al., *Pyrolysis of eucalyptus at different heating rates: studies of char characterization and oxidative reactivity*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2005. **74**(1): p. 307-314.
17. Chen, D., J. Zhou, and Q. Zhang, *Effects of heating rate on slow pyrolysis behavior, kinetic parameters and products properties of moso bamboo*. *Bioresource Technology*, 2014. **169**: p. 313-319.
18. Zhou, S., et al., *Effect of particle size on the composition of lignin derived oligomers obtained by fast pyrolysis of beech wood*. *Fuel*, 2014. **125**: p. 15-19.
19. Jin, H., et al., *Leaching of heavy metals from fast pyrolysis residues produced from different particle sizes of sewage sludge*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014. **109**: p. 168-175.
20. Luo, G. and F.L.P. Resende, *Fast pyrolysis of beetle-killed trees*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014. **110**: p. 100-107.
21. Fuentes-Cano, D., et al., *The influence of volatiles to carrier gas ratio on gas and tar yields during fluidized bed pyrolysis tests*. *Fuel*, 2018. **226**: p. 81-86.
22. Jiang, H., et al., *Pyrolysis kinetics of spent lark mushroom substrate and characterization of bio-oil obtained from the substrate*. *Energy Conversion and Management*, 2014. **88**: p. 259-266.

23. นคร ทิพย์วงศ์, เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. 2552: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
24. วิทยา เรืองพรวิสุทธิ์, เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง. 2554, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.
25. นพิตา ธิญชีระนันท์, เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. 2556, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
26. Conesa, J.A. and A. Domene, *Gasification and pyrolysis of Posidonia oceanica in the presence of dolomite*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015. **113**: p. 680-689.
27. Chaiwong, K., et al., *Study of bio-oil and bio-char production from algae by slow pyrolysis*. Biomass and Bioenergy, 2013. **56**: p. 600-606.
28. Hu, Z., et al., *Bio-oil production through pyrolysis of blue-green algae blooms (BGAB): Product distribution and bio-oil characterization*. Energy, 2013. **52**: p. 119-125.
29. Maisano, S., et al., *Catalytic pyrolysis of Mediterranean sea plant for bio-oil production*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(46): p. 28082-28092.
30. Ly, H.V., et al., *Fast pyrolysis of Saccharina japonica alga in a fixed-bed reactor for bio-oil production*. Energy Conversion and Management, 2016. **122**: p. 526-534.
31. Ross, A.B., et al., *Classification of macroalgae as fuel and its thermochemical behaviour*. Bioresour Technol, 2008. **99**(14): p. 6494-504.
32. Akhtar, J. and N. Saidina Amin, *A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(7): p. 5101-5109.
33. Zhao, B., et al., *Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar*. Journal of Cleaner Production, 2018. **174**: p. 977-987.
34. Leng, L. and H. Huang, *An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability*. Bioresour Technol, 2018. **270**: p. 627-642.
35. Pattiya, A., *Catalytic pyrolysis Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications*. 2018.

36. Yi, L., et al., *In situ upgrading of bio-oil via CaO catalyst derived from organic precursors*. Proceedings of the Combustion Institute, 2018.
37. Pütün, E., *Catalytic pyrolysis of biomass: Effects of pyrolysis temperature, sweeping gas flow rate and MgO catalyst*. Energy, 2010. **35**(7): p. 2761-2766.
38. Haydary, J., Jelemensky, L., Korenova, Z., Gasparovic, L., *Paper presented at the 36th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering*. 2009, Slovakia: Tatranske Matliare.
39. Stamatov, V., D. Honnery, and J. Soria, *Combustion properties of slow pyrolysis bio-oil produced from indigenous Australian species*. Renewable Energy, 2006. **31**(13): p. 2108-2121.
40. Zhang, Q., et al., *Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research*. Energy Conversion and Management, 2007. **48**(1): p. 87-92.
41. Miao, X., Q. Wu, and C. Yang, *Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2004. **71**(2): p. 855-863.
42. Küçükbayrak, S. and E. Kadioğlu, *Effect of pyrolysis on the proximate and ultimate analysis of lignite*. Thermochimica Acta, 1989. **155**: p. 1-6.
43. Sasaki, K., et al., *Effect of natural dolomite calcination temperature on sorption of borate onto calcined products*. Microporous and Mesoporous Materials, 2013. **171**: p. 1-8.
44. Kamsrisuk, S., Vitidsant. T.,, *Pyrolysis of micro algae to produce liquid fuels in continuous reactor*. 2015.
45. Ruengvilairat, P., Vitidsant, T.,, *Bio-oil production from oil palm empty fruit bunch by pyrolysis in nitrogen and steam atmospheres*. 2011.
46. Suttibak, S., K. Sriprateep, and A. Pattiya, *Production of Bio-oil via Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Fluidised-Bed Reactor*. Energy Procedia, 2012. **14**: p. 668-673.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Thanandorn Prakob
วัน เดือน ปี เกิด	07 April 1993
สถานที่เกิด	Chiang Rai
วุฒิการศึกษา	B.Eng Petrochemical and Polymeric Materials, Silpakorn University
ที่อยู่ปัจจุบัน	568 moo 1 Wiang sub-district, Wiang Pa Pao district, Chiang Rai province 57170
ผลงานตีพิมพ์	Prakob, T., Vitidsant, T., LIQUID FUEL PRODUCTION FROM PYROLYSIS OF <i>Ceratophyllum demersum</i> L. USING DOLOMITE IN CONTINUOUS REACTOR. The 28th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, 2018, Chonburi, Thailand. p. 266-279.
รางวัลที่ได้รับ	-