



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ	การผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่ด้วยวิธีไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง BIO-OIL PRODUCTION FROM BAMBOO BY PYROLYSIS IN FIXED-BED REACTOR		
ชื่อนิสิต	นาย ทีปกร ซอนรัมย์	เลขประจำตัว	6032922623
	นาย ธนวรรณ ว่องพิชิตกุล	เลขประจำตัว	6032925523
ภาควิชา	เคมีเทคนิค		
ปีการศึกษา	2563		

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการ การผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่ด้วยวิธีไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์
เบดนิ่ง

ชื่อนิสิตที่ร่วมในโครงการ นายทีปกร ขอนรัมย์
นายธนวรรธน์ ว่องพิชิตกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่กิมซุงด้วยวิธีการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิของการไพโรไลซิส 400 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคไม้ไผ่ 4 ช่วง คือ 0.25-0.50 0.50-0.71 0.71-1.18 และ 1.18-2.00 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 40 80 120 และ 160 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวแปรที่กำหนดให้คงที่คือ น้ำหนักของไม้ไผ่ 4 กรัม ความดันบรรยากาศ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลลัพธ์น้ำมันชีวภาพที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบและค่าความร้อน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) และเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ตามลำดับ ผลลัพธ์ของแข็งถูกนำไปสกัดความชื้นก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก ส่วนผลลัพธ์แก๊สที่เกิดขึ้น ถูกเก็บหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว 3 นาที ซึ่งนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ผลการทดลองพบว่า สภาวะการทดลองที่ให้น้ำมันชีวภาพมากที่สุด คือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดของไม้ไผ่ 0.50-0.71 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 120 โดยได้น้ำมันร้อยละ 54.37 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อน 23.93 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเดียวกัน คือ 23.14 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพพบว่า มีปริมาณสารในกลุ่มฟีนอลมากที่สุด รองลงมาคือ สารในกลุ่มคีโตน ไฮโดรคาร์บอน อีเทอร์ ฟูแรน แอลดีไฮด์ แซ็กคาไรด์ และมีปริมาณน้อยสุดคือสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก ตามลำดับ

คำสำคัญ: น้ำมันชีวภาพ, ไพโรไลซิส, ไม้ไผ่, เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

ลงมือชื่อนิสิต..... ทีปกร ขอนรัมย์

ลงมือชื่อนิสิต..... ธนวรรธน์ ว่องพิชิตกุล

ลงมือชื่อ อ.ที่ปรึกษา..... สุชญา น.

(ผศ.ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

Title Bio-oil Production from Bamboo by Pyrolysis in Fixed-bed reactor

Student Name Mr. Theepakorn Sonram

Mr. Tanawat Wongpichitkul

Advisors Asst. Prof. Dr. Suchaya Nitivattananon

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,

Academic Year 2020

Abstract

The purpose of this research is to study the production of bio-oil from Bambusa beecheyana Munro bamboo using pyrolysis process in fixed bed reactor. There are two parameters studied in this work: pyrolysis temperatures of 400, 450, 500 and 550 °C bamboo particle sizes of 0.25-0.50, 0.50-0.71, 0.71-1.18, and 1.18-2.00 mm and rate of nitrogen gas of 40, 80, 120 and 160 ml/min. The fixed parameters are initial feed of bamboo (4 gram) , operating at pressure (1 atm) and residence time (30 minutes). The bio-oil yielded were analyzed for compositions and heating values using gas chromatography mass spectrometer (GC-MS) and bomb calorimeter, respectively. The solid charcoal yielded was put in the desiccator before weighting. And, the gas produced yielded collected after 3 minutes of reaction was analyzed by gas chromatography. The results showed that the conditions given the maximum bio-oil production were at 500 °C , 0.50-0.71 mm particle size of bamboo and the rate of nitrogen gas at 120 ml/min. The bio-oil yielded was 54.37 percent by weight having heating value of 23.93 MJ/kg. The heating value of bio-oil from this work are as high as the bio-oil producing from eucalyptus wood which are 23.14 MJ/kg. According to the compositions analysed of bio-oil, the highest composition was Phenols group, followed by Ketones, Hydrocarbons, Ethers, Furans, Aldehyde, Saccharide and the least was Carboxylic acids.

Keywords: Bio-oil, Pyrolysis, Bamboo, Fixed-bed reactor

Student's Signature..... *Theepakorn S.*.....

Student's Signature..... *Tanawat W.*.....

Advisor's Signature *Suchaya N.*.....

(Asst. Prof. Dr. Suchaya Nitivattananon)

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิตวิฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่ให้คำปรึกษาความรู้และแนวทางการทำงานอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการทำโครงการวิจัยนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงาน จากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์และสถานที่ในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสและไมไฝกิมซุง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้จัดการสิริชัย รัตนวราหะ และบุคลากรภายในศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ทำงานวิจัย และเครื่องมือวิเคราะห์ รวมไปถึงสถานที่พักสำหรับการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณวรเวช ศรีปราโมช ที่มอบความรู้เรื่องการใช้เครื่องปฏิบัติการไพโรไลซิสและวิธีการใช้อุปกรณ์วิเคราะห์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับงานวิจัยฉบับนี้

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง-ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปีโตรเลียม	4
2.1.1 น้ำมันดิบ (Crude oil)	4
2.1.1 แก๊สธรรมชาติ (Natural gas)	4
2.2 พลังงานทดแทน	5
2.3 ชีวมวล	6
2.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของชีวมวล	7
2.4 ไฟโรไลซิส	11
2.4.1 ประเภทของกระบวนการไฟโรไลซิส	12
2.4.2 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง	19
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	19
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์	21
3.3 ชีวมวลและสารเคมี	23
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	23
3.4.1 การเตรียมชีวมวลและวิเคราะห์สมบัติชีวมวล	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การออกแบบการทดลอง	24
3.4.3 การไฟโรไลซิสชีวมวล	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	27
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ไผ่กิมซุง	27
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของไม้ไผ่กิมซุง	27
4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของไม้ไผ่กิมซุง	27
4.2 ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเบตนึ่งของไม้ไผ่กิมซุง	29
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฟโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	29
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฟโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	30
4.2.3 ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฟโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	31
4.3 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	34
4.3.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพ	34
4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของแก๊ส	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ไผ่กิมซุง	39
5.1.2 ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์เบตนึ่งของไม้ไผ่กิมซุง	39
5.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	41
1. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	41
ภาคผนวก ข	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1. ผลของอุณหภูมิ ขนาดอนุภาค และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อผล ได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	42
ภาคผนวก ค	43
ภาคผนวก ง	45
บรรณานุกรม	46

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูป 2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล	10
รูป 2.2 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส	11
รูป 2.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor)	14
รูป 2.4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor)	15
รูป 2.5 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed)	15
รูป 2.6 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor)	16
รูป 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกูร์ (Auger reactor)	16
รูป 3.1 แผนภาพองค์ประกอบเครื่องไพโรไลซิส	19
รูป 3.2 เครื่องไพโรไลซิสสำหรับงานวิจัย	20
รูป 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-TCD)	21
รูป 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์ (GC-MS)	21
รูป 3.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN (CHN analysis)	22
รูป 3.6 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter)	22
รูป 3.7 ไม้ไผ่กิมซุงอายุ 6-7 ปี	23
รูป 3.8 ไม้ไผ่กิมซุง 4 ช่วงขนาดอนุภาคหลังผ่านการอบที่ใช้ในการทดลอง	24
รูป 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	29
รูป 4.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	30
รูป 4.3 ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	31
รูป 4.4 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	37
รูป ค-1 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของไม้ไผ่กิมซุงหลังอบเปรียบเทียบ กับงานวิจัยอื่น	27
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของไม้ไผ่กิมซุงหลังอบเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น	28
ตารางที่ 4.3 ผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจากภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง และเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งเครื่องเดียวกัน	32
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์ในไม้ไผ่กิมซุงกับงานวิจัยที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระ	34
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	35
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	36
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สจากการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงด้วยเทคนิคแก๊ส โครมาโทกราฟี (GC)	38
ตารางที่ ข-1 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงที่ขนาด อนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราไหล่แก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที	42
ตารางที่ ข-2 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราไหล่แก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที	42
ตารางที่ ข-3 ผลของอัตราไหล่แก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส ไม้ไผ่กิมซุงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร	42
ตารางที่ ค-1 องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ไม้ไผ่เป็นพลังงานชีวมวล (Biomass energy) ประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนชนิดใหม่ได้ เนื่องจากสามารถปลูกเพื่อการค้า มีการแตกกอและการเจริญเติบโตค่อนข้างดีให้ผลผลิตสูงในระยะเวลาสั้น สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนและได้หลายวัตถุประสงค์ ซึ่งการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่นั้นมีแนวคิดที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานเดียวกันกับการพัฒนาพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ไบโอดีเซล ไบโอดีเซล และแก๊สโซฮอล ซึ่งการใช้ไม้ไผ่หรือชีวมวลในการผลิตน้ำมันชีวภาพนั้นไม่ก่อให้เกิดก๊าซพิษ เช่น ซัลเฟอร์ออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น เนื่องจากการผลิตน้ำมันชีวภาพใช้กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) [1] อีกทั้งผลการวิเคราะห์น้ำมันโดยการกลั่นน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส มีปริมาณของน้ำมันเบนซินสูงถึงร้อยละ 85.09 โดยน้ำหนัก [2]

การผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) เป็นการนำชีวมวลที่เป็นของแข็งหลังจากผ่านกระบวนการบด (Grinding) แล้วมาผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส เพื่อย่อยสลายโครงสร้างทางเคมีของชีวมวลให้เล็กลง ผลิตผลที่ได้จากขั้นตอนนี้คือไอชีวมวลหรือไอไพโรไลซิส (Pyrolysis vapor) และถ่านชาร์ (Bio-char) ถ่านชาร์จะถูกแยกออกจากไอโดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าไซโคลน (Cyclone) จากนั้นไอไพโรไลซิสส่วนหนึ่งจะถูกควบแน่นที่เครื่องควบแน่น (Condenser unit) และผลิตผลที่ได้จากการควบแน่นคือของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้มที่เรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) อาจมีปริมาณผลผลิตสูงได้ถึงร้อยละ 75 ของน้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น [3] อีกทั้งต่างประเทศมีการพัฒนากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในระดับอุตสาหกรรมมาเป็นเวลากว่า 20 ปีแล้ว [4] ซึ่งเทคโนโลยีนี้ยังเป็นสิ่งใหม่ในประเทศไทยและต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มีคุณภาพดีได้ผลผลิตที่คุ้มค่ากับการลงทุน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่พบว่า ไม้ไผ่แต่ละชนิดให้ปริมาณของน้ำมันชีวภาพไม่เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น ไม้ไผ่กิมซุง (*Bambusa beecheyana* Munro) ไม้รวก (*Thyrsostachys siamensis* Gamble) ไม้ตงศรีปราชญ์ (*Dendrocalamus asper* Backer) ไม้หม่าจู (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) และไม้ขางหม่น (*Dendrocalamus sericeus*) โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดตกอิสระขนาดใช้ในห้องปฏิบัติการ พบว่า ไม้ไผ่กิมซุง (*Bambusa beecheyana* Munro) ให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพมากที่สุด โดยได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพร้อยละ 49.30 ของน้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น [1]

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความเป็นไปได้ที่จะนำไม้กิมซุงซึ่งหาได้ง่ายและมีอยู่ทั่วไปในประเทศไทยอีกทั้งยังให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่มาก เมื่อเทียบกับไม้ชนิดอื่นๆ มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง (Fixed-Bed Reactor) รวมถึงศึกษาตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อพัฒนาคุณภาพและปริมาณของผลผลิตของน้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 ศึกษาตัวแปรและสภาวะเหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่
- 2.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพและแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง (Fixed-Bed Reactor)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นผลของอุณหภูมิ ขนาดของอนุภาค และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพรวมถึงหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง (Fixed-Bed Reactor)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1 ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
- 2 จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัย
- 3 ศึกษาสมบัติของไม้ไผ่กิมซุง
 - 3.1 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาสารระเหย ความชื้น เถ้า และคาร์บอนคงตัว
 - 3.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน
 - 3.3 ค่าความร้อน (Heating value)
- 4 ออกแบบการทดลองโดยมีตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ
 - 4.1 ขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 - 0.50 0.50 - 0.71 0.71 - 1.18 และ 1.18 - 2.0 มิลลิเมตร
 - 4.2 อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ที่ 400 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส
 - 4.3 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 40 80 120 และ 160 มิลลิลิตรต่อนาที

4.4 เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 นาที

5 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้

5.1 วิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value) ของน้ำมันชีวภาพ

5.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพ

5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) และองค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

5.4 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และจัดทำเล่มรายงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้กิมซุง โดยใช้วิธีการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง (Fixed-Bed Reactor)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปีโตรเลียม

ปีโตรเลียมหมายถึงสารผสมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน โดยองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน พบได้ทั้งสามสถานะได้แก่ แก๊สของแข็ง และของเหลว โดยของเหลวมีสัดส่วนมากที่สุด รองลงมาคือแก๊ส ส่วนแก๊สธรรมชาติเหล่านั้นมีความหมายถึงแก๊สธรรมชาติในแหล่งที่อยู่ลึกลงไปใต้ดินภายใต้สภาพอุณหภูมิและความดันที่สูง เมื่อแก๊สนี้ถูกนำขึ้นมาถึงระดับผิวดินซึ่งมีอุณหภูมิและความดันลดลงแก๊สนี้จะกลายเป็นของเหลวจึงเรียกว่า แก๊สธรรมชาติเหลว [5]

2.1.1 น้ำมันดิบ (Crude oil)

น้ำมันดิบเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยกระจายอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของโลกทั้งใต้ทะเล ใต้ดินและในทะเลทราย องค์ประกอบของน้ำมันดิบจากแหล่งต่าง ๆ มีความซับซ้อนและแตกต่างกัน แม้แต่น้ำมันดิบที่มาจากแหล่งที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันก็ตาม โดยทั่วไปน้ำมันดิบเป็นสารผสมของสารชนิดต่าง ๆ หลายชนิด โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันดิบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีตั้งแต่โมเลกุลขนาดเล็กมีโครงสร้างง่าย ๆ จนกระทั่งถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อน นอกจากนี้ในน้ำมันดิบยังมีสารประกอบชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอีกด้วยโดยสารประกอบเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบของไนโตรเจน สารประกอบของกำมะถัน สารประกอบของออกซิเจน สารประกอบอินทรีย์ที่มีโลหะและสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นทำให้น้ำมันดิบในแต่ละแหล่งมีลักษณะและกลิ่นที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันดิบจากบางแหล่งมีลักษณะใสคล้ายน้ำและมีสีน้ำตาลอ่อน แต่ส่วนใหญ่แล้วน้ำมันดิบมีลักษณะที่หนืดและมีสีค่อนข้างดำ โดยน้ำมันดิบอาจมีกลิ่นเหม็นฉุน เนื่องจากมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) หรือแก๊สไข่เน่ารวมทั้งสารประกอบของกำมะถันชนิดอื่น ๆ ปะปนอยู่ [6]

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ (Natural gas)

ในปัจจุบันแก๊สธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญมากอีกแหล่งหนึ่งของโลก ซึ่งนอกประโยชน์ทางด้านพลังงานแล้ว แก๊สธรรมชาติยังสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีอีกด้วย โดยองค์ประกอบหลักของแก๊สธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งโดยทั่วไปในแก๊สธรรมชาติมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ร้อยละ 70 ขึ้นไปสำหรับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก๊สธรรมชาติ อาทิ อีเทนโพรเพน (Propane) บิวเทน

(Butane) นอกจากนี้แก๊สธรรมชาติยังประกอบด้วยสารชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำ ไฮโดรเจน ซัลไฟด์ ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นต้น ด้วยเหตุที่แก๊สธรรมชาติประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ดังนั้นการนำแก๊สธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ จึงต้องมีการแยกองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกจากกัน เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบเหล่านั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุด [6]

2.2 พลังงานทดแทน

พลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มากเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้ว สามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ และไฮโดรเจน เป็นต้น เป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นการศึกษาค้นคว้า ทดสอบ พัฒนา และสาธิต ตลอดจนส่งเสริมและเผยแพร่พลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น พลังงานลม แสงอาทิตย์ ชีวมวลและอื่นๆ เพื่อให้มีการผลิต และการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย มีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมทั้งทางด้านเทคนิค เศรษฐกิจและสังคม สำหรับผู้ใช้ในเมือง และชนบท ซึ่งในการศึกษา ค้นคว้า และพัฒนาพลังงานทดแทนดังกล่าวยังรวมถึงการพัฒนาเครื่องมือเครื่องใช้ และอุปกรณ์เพื่อการใช้งานมีประสิทธิภาพสูงสุดด้วยงานศึกษา และพัฒนาพลังงานทดแทน เป็นส่วนหนึ่งของแผนงานพัฒนาพลังงานทดแทน ซึ่งมีโครงการที่เกี่ยวข้องโดยตรงภายใต้แผนงานนี้คือ โครงการศึกษาวิจัยด้านพลังงาน และมีความเชื่อมโยงกับแผนงานพัฒนาชนบทในโครงการจัดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า ประจุแบตเตอรี่ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับหมู่บ้านชนบทที่ไม่มีไฟฟ้า โดยงานศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทนจะเป็นงานประจำที่มีลักษณะการดำเนินงานของกิจกรรมต่างๆ ในเชิงกว้างเพื่อสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน ทั้งในด้านวิชาการเชิงทฤษฎี และอุปกรณ์เครื่องมือทดลอง และการทดสอบ รวมถึงการส่งเสริมและเผยแพร่ ซึ่งจะเป็นการสนับสนุนและรองรับความพร้อมในการจัดตั้งโครงการใหม่ๆ ในโครงการศึกษาวิจัยด้านพลังงานและโครงการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การศึกษาค้นคว้าเบื้องต้น การติดตามความก้าวหน้าและร่วมมือประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาต้นแบบทดสอบ วิเคราะห์ และประเมินความเหมาะสมเบื้องต้นและเป็นงานส่งเสริมการพัฒนาโครงการที่กำลังดำเนินการให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นตลอดจนสนับสนุนให้โครงการที่เสร็จสิ้นแล้วได้นำผลไปดำเนินการส่งเสริมและเผยแพร่และการใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมต่อไป [7]

2.3 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีการใช้กันมานานแล้วตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ เช่น การนำเศษกิ่งไม้แห้งมาก่อเป็นกองแล้วจุดไฟเพื่อให้ความร้อนและแสงสว่างของมนุษย์ในสมัยที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเศษกิ่งไม้แห้งนี้ถือเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดหนึ่ง ชีวมวลนั้นยังนับเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งด้วยเนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถหาได้และเกิดทดแทนขึ้นในธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเป็นวัฏจักรไปเรื่อย ๆ [8] จากการใช้งานและเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นทำให้วัฏจักรการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาความร้อนเนื่องจากการใช้ เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นระบบปิด (Closed Carbon Cycle or Zero Carbon Emission Cycle)

จุดเด่นของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล คือ เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถหาได้ง่ายโดยมีอยู่ทั่วไปในท้องถิ่นนั้น ๆ และการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลมาเป็นพลังงานมีต้นทุนที่ไม่สูง เช่น ในพื้นที่ชนบทบางพื้นที่ได้นำไม้พินมาใช้เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับประกอบอาหาร หรือ ในพื้นที่ที่ต้องการใช้ไฟฟ้าก็สามารถนำเชื้อเพลิงชีวมวลที่สามารถหาได้รอบ ๆ พื้นที่นั้นมาเป็นเชื้อเพลิงขั้นต้นสำหรับกระบวนการผลิตไฟฟ้าได้เช่นกัน นอกจากนี้การเพาะปลูกพืชชีวมวลยังสามารถสร้างรายได้ให้แก่ประชาชนได้ในท้องถิ่นนั้นได้ [9] นักวิจัยบางท่านได้แบ่งประเภทของชีวมวลตามปริมาณความชื้นภายในชีวมวล (Moisture Content) เพื่อสะดวกต่อการเลือกใช้เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวล ชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูงประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักเช่น ชานอ้อย, มูลสัตว์ และ กากน้ำตาล เป็นต้น จะเรียกประเภทของชีวมวลนี้ว่า Wet Conversion Process ส่วนชีวมวลที่มีความชื้นต่ำ เช่น ฟางข้าว, ไม้พิน และ แกลบ เป็นต้น จะเรียกว่า Dry Conversion Process, [10] ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของชีวมวลออกเป็น 6 ประเภทจากแหล่งกำเนิดของชีวมวลนั้น ๆ [8] ซึ่งได้แก่

1. ชีวมวลที่เกิดจากการเพาะปลูก ซึ่งชีวมวลประเภทนี้มีการปลูกขึ้นมาแล้วเหลือจากใช้ในจุดประสงค์หลักของการปลูก เช่นปลูกเพื่อเป็นอาหารแก่คนหรือสัตว์ หรือปลูกขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลโดยตรงชีวมวลประเภทนี้ เช่น ปาล์มน้ำมัน, ข้าวโพด, ถั่วเหลือง และ มันสำปะหลัง เป็นต้น
2. ชีวมวลที่เกิดขึ้นหลังการเกิดไฟไหม้ป่า ชีวมวลชนิดนี้จะเกิดขึ้นหลังมีการเกิดไฟไหม้ป่าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นประจำ โดยชีวมวลประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นพวกเศษกิ่งไม้ และลำต้น ของต้นไม้ที่หลงเหลือจากไฟไหม้ป่า
3. ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากของเสียทางการเกษตร ชีวมวลประเภทนี้จะเกิดขึ้นระหว่างการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปพืชผลทางการเกษตร เช่น แกลบ, ฟางข้าว, กะลาปาล์มและ กาบ

4. ชีวมวลที่เกิดขึ้นในป่าและอุตสาหกรรมป่าไม้ ชีวมวลประเภทนี้สามารถหาได้ในป่า เช่น เศษใบไม้ กิ่งไม้ที่หักจากต้นไม้ ต้นไม้ที่ตายไปแล้ว หรือแม้กระทั่งของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ เช่น ไม้เลื้อย และ ปีกไม้ เป็นต้น

5. ชีวมวลจากมูลสัตว์ ชีวมวลประเภทนี้เป็นสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ เช่น มูลวัว มูลแพะ มูลไก่ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้จะมีความชื้นที่สูงมาก

6. ชีวมวลจากขยะชุมชน ชีวมวลประเภทนี้คือขยะที่เราทิ้งกันทุก ๆ วัน ซึ่งสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ขยะชุมชน (Municipal Solid Waste)

อย่างไรก็ตามประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรอุตสาหกรรม พบว่าในแต่ละปีมีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมากและในกระบวนการเก็บเกี่ยวหรือกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านั้นจะให้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน โดยแหล่งผลิตชีวมวลที่สำคัญของประเทศไทยมีด้วยกัน 8 แหล่งหลักคือ [11]

1. แกลบจากโรงสีข้าว
2. กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล
3. กากปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
4. เศษไม้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารา สวนยางพารา เศษไม้ยูคาลิปตัสจากกันตัดไม้เพื่อจำหน่าย และโรงงานผลิตไม้อัด
5. ชังข้าวโพดการแยกเมล็ดข้าวโพดออกซึ่งกระจายอยู่ตามไร่ข้าวโพด
6. กาบมะพร้าวจากสวนมะพร้าว ร้านขายส่งลูกมะพร้าว และโรงงานแปรรูปเนื้อมะพร้าว
7. ส่าเหล้าจากโรงงานผลิตเอทิลแอลกอฮอล์
8. กากมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง และเห้งมันสำปะหลังจากการเกษตร

2.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของชีวมวล

สารชีวมวลนั้นมีหลากหลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบต่างกัน องค์ประกอบขั้นต้นได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน ต้นไม้มีองค์ประกอบหลักได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน รวมถึงพืชสมุนไพรเพียงแต่ปริมาณขององค์ประกอบที่จะแตกต่างกัน สารชีวมวลต่างชนิดกัน ย่อมมีองค์ประกอบต่างกัน เช่น กล้วยพีชมีแป้งมาก ในขณะที่ของเสียจากปศุสัตว์มีโปรตีนมาก เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันจากการใช้พลังงานจากสารชีวมวลส่วนใหญ่ประกอบด้วย ลิกโนเซลลูโลส ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น เซลลูโลส และ ลิกนินจำนวนมาก เช่น ต้นไม้ ซึ่งมีจำนวนมากและมีศักยภาพมาก [12,13]

2.3.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นโซ่ยาวของ กลูโคส พบมากในพืชเพื่อทำหน้าที่เสริมโครงสร้างของลำต้นกิ่งก้านของพืช ผักและผลไม้ให้แข็งแรง เป็น ส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์พืช และพบว่าสารคาร์บอนทั้งหมดที่ประกอบอยู่ในสารอินทรีย์ (Organic carbon) ในโลกนี้มากกว่าครึ่งหนึ่งเป็น เซลลูโลส (Cellulose) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาล ดี-กลูโคส (D-glucose molecules) ที่จัดเป็นเส้นยาวตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ เบต้า-1,4 ไกลโคซิดิก (beta-1,4 glycosidic bonds) ตามรูป 2.1-a [12]

การย่อยสลายเซลลูโลสเกิดขึ้นที่ 240-350 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส จะเป็นขั้นตอนเกิดเซลลูโลสกัมมันต์ (Active cellulose หรือ Anhydrocellulose) ก่อนที่ เซลลูโลสกัมมันต์เกิดปฏิกิริยาต่อไป เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของโซ่พอลิเมอร์โดยเฉพาะพันธะไกลโคซิดิกได้ผลิตภัณฑ์เป็น เลโวกลูโคซาน (Levoglucosan) และฟูแรน (Furan) และจากการศึกษาเมื่อเซลลูโลสถูกไพโรไลซ์ที่อัตราความร้อน 12 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศฮีเลียม ในการทดลอง DTA จะสังเกตเห็นปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิ 335 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำหนักชีวมวลลดลงสูงสุด ปฏิกิริยาจะเสร็จสมบูรณ์ที่ 360 องศาเซลเซียส [12,13,14,15]

2.3.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส เป็น เฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีน้ำตาลไซโลส (xylose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง บีตา-1,4 เป็นโซ่หลัก อาจมีน้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแล็กโทส (galactose) หรือ กลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลักด้วยและมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือ โซ่แขนงได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) กรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) เนื่องจากตึกรีโพลิเมอร์ไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50-200 โดยมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลสเป็นจำนวนมากสามารถละลายได้ในสารละลายเบส เฮมิเซลลูโลสทั่วไปคือไซแลน (Xylan) ซึ่งประกอบด้วยไซโลส (xylose) ด้วย พันธะ 1,4 รูป 2.1-e แสดงสูตรโครงสร้างของไซแลน (Xylan) อย่างไรก็ตาม เฮมิเซลลูโลส ทั้งหมดขึ้นกับชนิดและส่วนของพืช

เฮมิเซลลูโลล (Hemicellulose) สสลายตัวที่อุณหภูมิ 200-260 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดสารระเหยมากขึ้น ทาร์น้อยกว่าและมีถ่านน้อยกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่ไม่ให้เลโวกลูโคซาน (Levoglucosan) ในปริมาณที่มีนัยสำคัญ กรดอะซิติคส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อยจากไม้ในระหว่างการไพโรไลซิสเป็นผลมาจากการ

สลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้อแข็งประกอบด้วยไซแลน (Xylan) ปริมาณมากและมีกลูโคแมนแนน (Glucomanan) ในปริมาณเล็กน้อย เฮมิเซลลูโลสไม้เนื้ออ่อนมีไซแลนจำนวนเล็กน้อยและกาแลคโตกลูโคแมนแนนปริมาณมาก การเริ่มต้นของการสลายตัวด้วยความร้อนของเฮมิเซลลูโลสเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าเซลลูโลสซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก การสูญเสียเฮมิเซลลูโลสเกิดขึ้นในไพโรไลซิสของไม้อย่างช้า ๆ ในช่วงอุณหภูมิ 130-194 องศาเซลเซียส โดยการสูญเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ไม่มีรายงานความเกี่ยวข้องของการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลสในการไพโรไลซิสแบบเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเพียงไม่กี่วินาทีด้วยอัตราการให้ความร้อนที่สูง การที่โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสเป็นอสัณฐานส่งผลให้ถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายโดยกรดหรือด่าง รวมถึงเอนไซม์บางประเภท โดยแตกต่างจากเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งทนต่อการไฮโดรไลซิส การไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคล้ายคลึงกัน แต่มีปริมาณที่แตกต่างกันโดยมีฟูแรน คีโตน และน้ำตาลแอนไฮดรัสเป็นองค์ประกอบหลัก [12,13,14]

2.3.1.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรง อยู่ร่วมกับเซลลูโลส (cellulose) และ hemicellulose เป็นส่วนประกอบของเปลือก ซึ่งหรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของราก ลำต้น และจะถูกสร้างจากส่วนโคนต้นสุ่ยยอด เมื่อพืชมีอายุมากขึ้นปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย ลิกนิน (Lignin) เป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ให้พลังงาน โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยไซโมเลกุลของ ออกซิเจนเตเตตฟีนิลโพรเพน (oxygenated phenyl propane) ดังรูป 2.1-d มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000-4,500 ดาลตัน สันเคราะห์จากอนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ได้แก่ คูมาริล (coumaryl) โคนิเฟอริล (coniferyl) และไซนาพิล (sinapyl) ไม่สลายทั้งในกรดและด่าง

ไม้เนื้ออ่อนจะมีกุเอซิลเป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ไม้เนื้อแข็งจะมี ปริมาณไซริงกิลและกุเอซิลในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ไม้เนื้อแข็งมีปริมาณของหมู่เมทอกซิลสูงกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้การที่มีหน่วยโครงสร้างพื้นฐานในปริมาณที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณหมู่ ฟังก์ชันเมทอกซิล ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล และคาร์บอนิลแตกต่างกันด้วย การที่มีหมู่ฟังก์ชัน เมทอกซิลในปริมาณที่สูงของไม้เนื้อแข็งส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของลิกนินน้อยกว่าไม้เนื้ออ่อน เนื่องจากการแตกตัวของหมู่เมทอกซิลจะสร้างสารอนุมูลขนาดเล็ก ซึ่งช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของลิกนินไปเป็นถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของเมทอกซิล เช่น ฟีนอล มีเทน และเมทานอล เป็นต้น [12,13,14,15]

2.3.1.4 แป้ง (Starch)

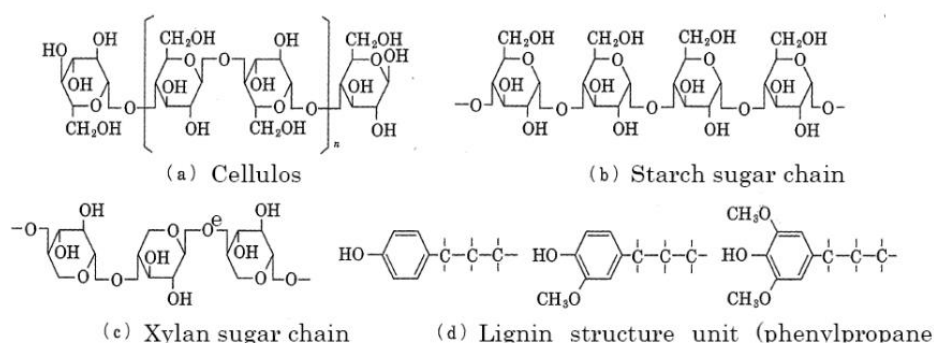
แป้งเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาล ดี-กลูโคส (D-glucose molecules) ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟาไกลโคซิดิก (alpha-1,4 glycosidic bonds) เนื่องจากความต่างของโครงสร้างพันธะเซลลูโลสไม่ละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้ง ในรูป 2.1-b จะละลายในน้ำร้อน (อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 จนถึง 50,000 ประมาณร้อยละ 10-20 ของแป้ง) และบางส่วนที่ไม่ละลาย (อะไมโลเพกซิน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 ถึง 100,000 ประมาณร้อยละ 80 - 90 ของแป้ง) แป้งถูกพบในเมล็ด ราก และลำต้น ซึ่ง ถือเป็นอาหาร [12,13]

2.3.1.5 โปรตีน (Protein)

เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกโพลิเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกันขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับของโพลิเมอร์ไรเซชัน โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวมวลและมีสัดส่วนน้อยกว่า 4 สารข้างต้นที่กล่าวมา [12]

2.3.1.6 สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)

สารประกอบอินทรีย์อื่นๆ มีได้หลากหลายขึ้นกับชนิดของพืช สารอินทรีย์ที่มีจำนวนมาก ได้แก่ กลีเซอรอล (glycerol) (ตัวอย่าง เช่น น้ำมันผักกาดก้านขาว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ) และซูโครส ในอ้อยและต้นบีท ตัวอย่างอื่นๆ เช่น อัลคาลอยด์ รงควัตถุ เทอร์ปีน และซีมีง ถึงแม้ว่าจะพบสารเหล่านี้ได้น้อย แต่คุณค่ามากเนื่องจากใช้เป็นส่วนผสมของยา สารชีวมวลนั้นประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่แต่ยังประกอบด้วยสารอนินทรีย์ เช่นซีลีเนียมในจำนวนน้อย ธาตุโลหะพื้นฐานได้แก่ แคลเซียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม เหล็กและโซเดียม สารและปริมาณขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น [12,13]

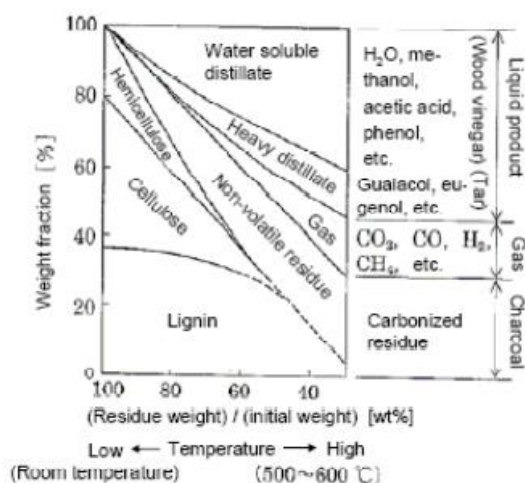
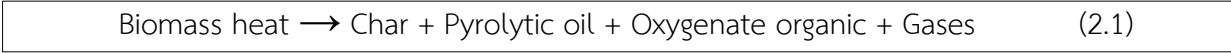


รูป 2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล [12]

2.4 ไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนรูปของชีวมวล พลาสติก รวมถึงยางที่ใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (charcoal) น้ำมัน (bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (non-condensable gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น

ไพโรไลซิสชีวมวลสามารถอธิบายได้โดยง่ายตามสมการที่ 2.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของสารชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน รูป 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบระหว่างเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินนั้น จะถูกย่อยสลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกลายเป็นผลิตภัณฑ์หลัก 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ของเหลว (Liquid product) ประกอบไปด้วย น้ำ เมทานอล (methanol) กรดอะซิติก (Acetic Acid) ฟีนอล (Phenol) และอื่นๆ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะสามารถพบในน้ำมันชีวภาพ ส่วนที่ 2 แก๊ส (Gas) ประกอบไปด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) แก๊สมีเทน (CH₄) และอื่นๆ และ ส่วนที่ 3 ถ่านชาร์ (Charcoal) เศษของแข็งที่เหลือร้อยละ 10 – 25 โดยน้ำหนัก [12,13]



รูป 2.2 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส [12,13]

ในระหว่างปฏิกิริยาไพโรไลซิส ความชื้นจะระเหยก่อนที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส ตามด้วยเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 240-340 องศา

เซลเซียส และลิกนินที่อุณหภูมิ 280-500 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุด ดังนั้นที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุดภายใน 1 นาที ขณะที่ถ้าอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุดภายใน 5 วินาที อัตราการให้ความร้อนที่สูงมีผลทำให้อัตราการเกิดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอน้ำรวดเร็วขึ้น

ปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ขั้นแรกการสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (Devolatilization) ขั้นที่สองเป็นการสลายตัวของวัตถุดิบเอง ซึ่งแบ่งการสลายตัวเป็นสองขั้น คือ ปฐมภูมิ (Primary cracking) และทุติยภูมิ (Secondary cracking) โดยองค์ประกอบที่สามารถสลายตัวได้ที่สภาวะที่ใช้ ก็จะแตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลง และเล็กลงเรื่อยๆ ที่ขั้นปฐมภูมิ (Primary cracking) ตามเวลาที่ให้หรืออุณหภูมิที่กำหนดจนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของวัตถุดิบ แต่ถ้ามีการให้ความร้อนและเวลายาวเกินไป สารที่ได้จากการสลายตัวของวัตถุดิบในขั้นแรก จะสลายตัวต่อไปที่ขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) ส่งผลให้สารที่แตกตัวกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นของแข็งชั้นเหนียวติดอยู่ตามอุปกรณ์ต่างๆ และกลายไอระเหยที่เพิ่มมากขึ้น เป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ โดยอุณหภูมิแต่ละขั้นแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และเมื่อให้ความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) มากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่ความดันสูงและทำให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) มากขึ้นทำให้เกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงและทำให้เกิดแก๊สที่ไม่ควบแน่นที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ให้ความดันต่ำปฏิกิริยาการสลายตัวเป็นแก๊สลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลว น้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น [12,13]

2.4.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้หลักเป็น 2 [16] ประเภท คือ

1. ไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400 - 600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นของเหลวร้อยละ 30 - 50 และถ่านชาร์ร้อยละ 25 - 35 ไพโรไลซิสแบบช้า ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (Carbonization pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลานาน โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะก๊าซจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15 - 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้งสามสถานะ คือ ถ่านชาร์ น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว

เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีซิวหรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันชีวภาพได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ เช่น อะซิโตน คีโตน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น

2. ไพโรไลซิสแบบเร็ว

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง 400 - 650 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) เมื่อใช้วัตถุดิบประเภทชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลวเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ ประมาณร้อยละ 60 - 75 ของแข็งร้อยละ 15 - 25 และก๊าซไม่กลั่นตัวร้อยละ 10 - 15 และมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพร้อยละ 10 - 30 ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังประกอบด้วยสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล ดังนั้นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบอินทรีย์ ทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วสามารถปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมีได้หลายประเภท

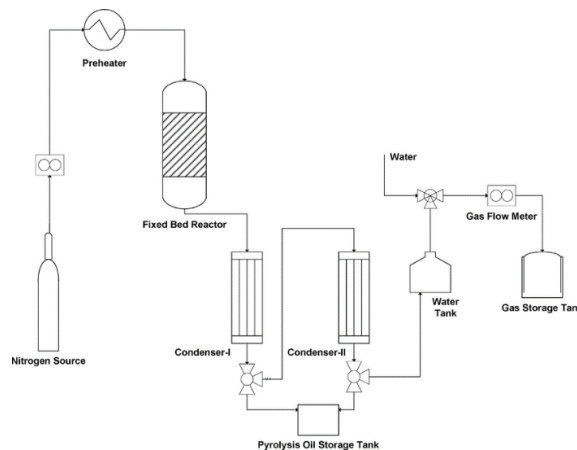
2.4.2 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิสเชื้อเพลิงแข็งที่สามารถแตกสลายเชิงความร้อนและเกิดการแตกตัวของสารระเหยไปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สของเหลว และของแข็งในอดีตเตาไพโรไลซิสถูกสร้างเพื่อให้ความร้อนอย่างช้า ๆ แก่ชีวมวลเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นถ่าน ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสในลักษณะต่าง ๆ ที่มีการให้ความร้อนโดยออกแบบให้มีอัตราการให้ความร้อน มีการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาที่ชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะตามความต้องการนำไปใช้งาน เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานพื้นฐานได้เป็น 5 ประเภทดังนี้ [17]

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed bed reactor)

ปัจจุบันการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบตนิ่งถูกพัฒนาสำหรับปฏิกิริยาไพโรไลซิสโดยหลักการของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบตนิ่งคือ ให้แก๊สตัวพาเคลื่อนที่ผ่านชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งทำหน้าที่เป็นเบตอยู่กับที่ เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนที่เป็นเบตชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งจะเกิดการแตกสลายเชิงความร้อนได้เป็นสารระเหยในรูปแก๊สและไอของสารระเหย ซึ่งจะถูกแก๊สตัวพานำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ และ

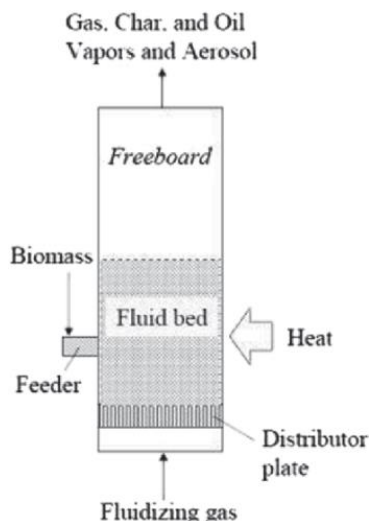
ผ่านหน่วยทำความเย็นและควบแน่นที่ทำให้แก๊สที่เกิดจากการไพโรไลซิสที่สามารถควบแน่นได้กลับเป็นของเหลว ในขณะที่แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะถูกแยกออกไปและชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งที่สลายตัวเชิงความร้อนเป็นสารระเหย หรือสลายตัวไม่หมดก็จะคงอยู่เป็นถ่านในเครื่องปฏิกรณ์



รูป 2.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed bed reactor) [18]

2. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor)

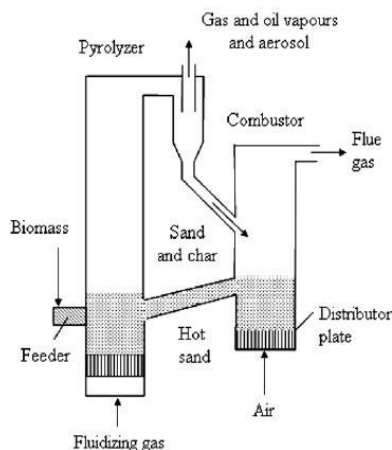
การสร้างและใช้งานฟลูอิดไคซ์เบตแบบฟองอากาศทำได้ง่าย โดยต้องควบคุมอุณหภูมิการสัมผัสของแข็งกับก๊าซและการถ่ายเทความร้อนให้ดี เนื่องจากมีความหนาแน่นของของแข็งสูงในเบตทรายอุณหภูมิจึงเป็นเพศของแข็งในเบต ซึ่งจะให้ความร้อนแก่ชีวมวลอย่างรวดเร็วในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่ออกซิเจนซึ่งจะถูกย่อยสลายเป็นถ่าน ไอแก๊ส และละอองลอย กระแสแก๊สฟลูอิดไคซ์บ่งบอกถึงองค์ประกอบชีวมวลที่ย่อยสลายซึ่งผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์ดังแสดงใน รูป 2.4 หลังจากเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสถ่านจะถูกกำจัดโดยเครื่องแยกไซโคลนและเก็บไว้ จากนั้นไอที่เหลือจะถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วด้วยระบบควบแน่นไอรระเหยเป็นน้ำมันชีวภาพและกักเก็บไว้ การทำไพโรไลซิสแบบฟลูอิดไคซ์เบตแบบฟองอากาศเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากผลิตน้ำมันชีวภาพคุณภาพสูงและผลผลิตของเหลวประมาณร้อยละ 70 –75 ของน้ำหนักชีวมวลแบบแห้ง ถ่านไม่สะสมในฟลูอิดไคซ์เบตแต่จะถูกแยกออกอย่างรวดเร็ว เวลาที่อยู่อาศัยของของแข็งและไอถูกควบคุมโดยอัตราการไหลของแก๊สคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบตแบบฟองอากาศคือ ต้องมีขนาดอนุภาคชีวมวลขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2-3 มม.) เพื่อให้ได้อัตราการให้ความร้อนชีวมวลสูง [19]



รูป 2.4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองอากาศ
(Bubbling fluidized-bed reactor) [19]

3. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนมีคุณสมบัติคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบมีฟอง ยกเว้นเวลาที่อยู่อาศัยที่สั้นกว่าสำหรับถ่านและไอระเหยส่งผลให้ความเร็วของแก๊สและปริมาณถ่านในน้ำมันชีวภาพสูงกว่าในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดฟองอากาศ ข้อดีอย่างหนึ่งคือเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้เหมาะสมสำหรับปริมาณงานที่มาก แม้ว่าอุทกพลศาสตร์จะซับซ้อนกว่าโดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดหมุนเวียนมีสองประเภทคือ แบบหมุนเวียนเดี่ยว และแบบหมุนเวียนคู่ [19]

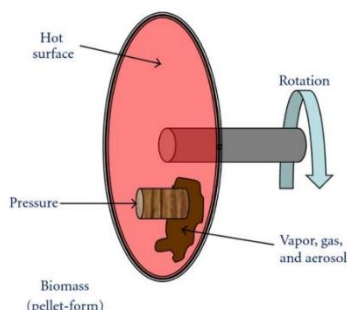


รูป 2.5 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน
(Circulating fluidized beds and transported bed) [19]

4. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรลิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor)

เป็นกระบวนการที่ให้เนื้อชีวมวลถูกกดเข้ากับพื้นผิวร้อน ซึ่งมีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างกัน มีการนำความร้อนเกิดขึ้นระหว่างผิวเนื้อชีวมวลจะเกิดการหลอมที่ผิวร้อนได้เป็นแผ่นฟิล์มน้ำมันและระเหยออกมา

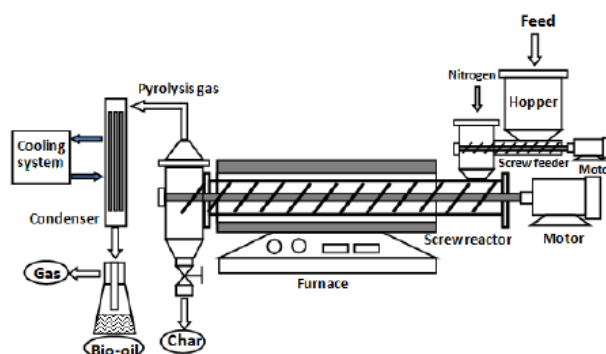
อย่างรวดเร็ว รูปแบบเตาลักษณะนี้สามารถใช้ได้กับชีวมวลขนาดใหญ่ โดยขนาดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ นอกจากนี้เตาปฏิกรณ์จะมีขนาดค่อนข้างกะทัดรัด แต่มีข้อเสียด้านการควบคุมพื้นผิวให้ร้อนและชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ที่อุณหภูมิสูง [20]



รูป 2.6 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ
(Ablative pyrolysis reactor) [20]

5. เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor)

ในเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้ใช้สกรูเพื่อเคลื่อนย้ายวัตถุดิบชีวมวลผ่านท่อความร้อนทรงกระบอกที่ปราศจากออกซิเจน ทางเดินในท่อที่มีอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ต้องการตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการถ่ายโอนความร้อนไปยังชีวมวลทำให้เกิดการแตกตัวการเป็นไอระเหย และเกิดถ่านขึ้น ส่วนไอระเหยจะควบแน่นเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยมีไอระเหยที่ไม่ควบแน่นรวมตัวเป็นแก๊สชีวภาพ [19]



รูป 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor) [19]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นฤมล ภานุนำภา และคณะ [1] การศึกษาการใช้ประโยชน์ไม้ไผ่ด้านการผลิตน้ำมันชีวภาพ ใช้ตัวอย่างไม้ไผ่ 5 ชนิด คือ ไม้กิมซุง (*Bambusa beecheyana* Munro) ไม้รวก (*Thyrsostachys siamensis* Gamble) ไม้ตงศรีปราชญ์ (*Dendrocalamus asper* Backer) ไม้หม่าจู้ (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) และไม้ชางหม่น (*Dendrocalamus sericeus*) โดยใช้ เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดตกอิสระขนาดใช้ใน

ห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนรวม 4 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อนชีวมวลที่ 100 กรัมต่อชั่วโมง และเวลาในการไพโรไลซิส 1 ชั่วโมง ไม่ไฟที่ให้ปริมาณน้ำมันมากที่สุดคือ ไผ่กิมซุง ให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพร้อยละ 49.30 ของน้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น รองลงมาคือไผ่รวก ไผ่ตงศรีปราจีน ไผ่หมาจู้ และไผ่ซางหม่น ให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพร้อยละ 46.55 44.36 42.58 และ 33.61 ของน้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้พบว่า ปริมาณของแข็ง ค่าความร้อน ค่าพีเอช ความหนาแน่น และค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM Burner Fuel ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไผ่ทั้ง 5 ชนิดนี้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ศิวัช ภูระหงษ์ [21] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู จากซีลีเยอูคาลิปตัส โดยใช้ขนาดอนุภาคสี่ระดับ คือ 250-500 ไมโครเมตร 500-850 ไมโครเมตร 850-1080 ไมโครเมตร และ 1080-2000 ไมโครเมตร พบว่าที่ขนาดที่เหมาะสมคือ 500-850 ไมโครเมตร ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุด นอกจากนี้ยังศึกษาตัวแปรอุณหภูมิในการไพโรไลซิส 450 และ 650 องศาเซลเซียส สภาวะที่ไม่มีอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน และ ที่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการป้อนสาร 200 และ 600 รอบต่อนาที พบว่าได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 52.67 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากนั้นนำน้ำมันชีวภาพไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) เพื่อหาลักษณะประกอบและหมู่ฟังก์ชัน และเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) พบว่ามีสารประกอบของอนุพันธ์ของฟีนอล แอลกอฮอล์ และคีโตนเป็นส่วนใหญ่

วรวช ศรีปราโมช [22] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในการผลิตน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลทั้งสองชนิดคือ เวลาทำปฏิกิริยาที่ 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และขนาดอนุภาคของชีวมวลระหว่าง 0.50-0.71 มิลลิเมตร ส่วนอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนสำหรับไม้ยูคาลิปตัสคือ 120 มิลลิลิตรต่อนาที และสำหรับซังข้าวโพดคือ 80 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดที่ร้อยละ 57.49 และ 52.53 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลทั้งสองชนิดให้ค่าความร้อนสูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกันคือ 23.14 และ 23.27 เมกะจูล/กิโลกรัม ตามลำดับ สอดคล้องกับอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากชีวมวลทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่าในตอนที่เป็นชีวมวลเริ่มต้น เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพพบว่าส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มฟีนอล

รองลงมาคือสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก แอลดีไฮด์ อีเทอร์ คีโตน ไฮโดรคาร์บอน แฮ็กคาไรด์ และสารที่มีปริมาณน้อยสุดคือสารในกลุ่มฟูแรน และจากการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมด์และเอพซีซีใช้แล้วพบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลทั้งสองชนิดคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ

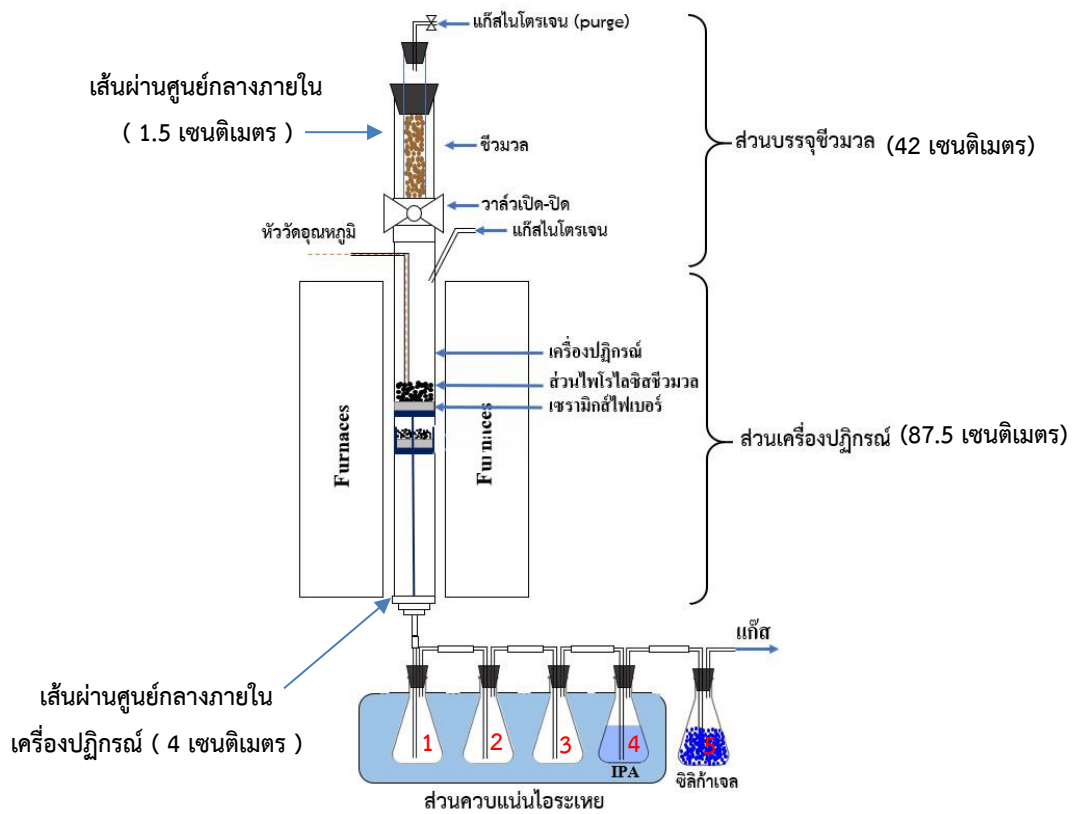
Anil Kumar Varma และคณะ[23] ได้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ชี้เลี้ยง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (Semi batch) และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน และขนาดอนุภาคของชี้เลี้ยง โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 350–650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50–200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และขนาดอนุภาคอยู่ที่ระหว่าง 0.25 ถึง 1.7 มิลลิเมตร พบว่าได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 44.16 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ขนาดอนุภาคที่ 0.6 – 1 มิลลิเมตร องค์ประกอบและคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันชีวภาพและถ่านถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น อัลติเมทอนาไลซิส ฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรไมโครสโคป แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมทรี (GC-MS) และ นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคปี (^1H NMR) เพื่อระบุลักษณะของน้ำมันชีวภาพ

บทที่ 3

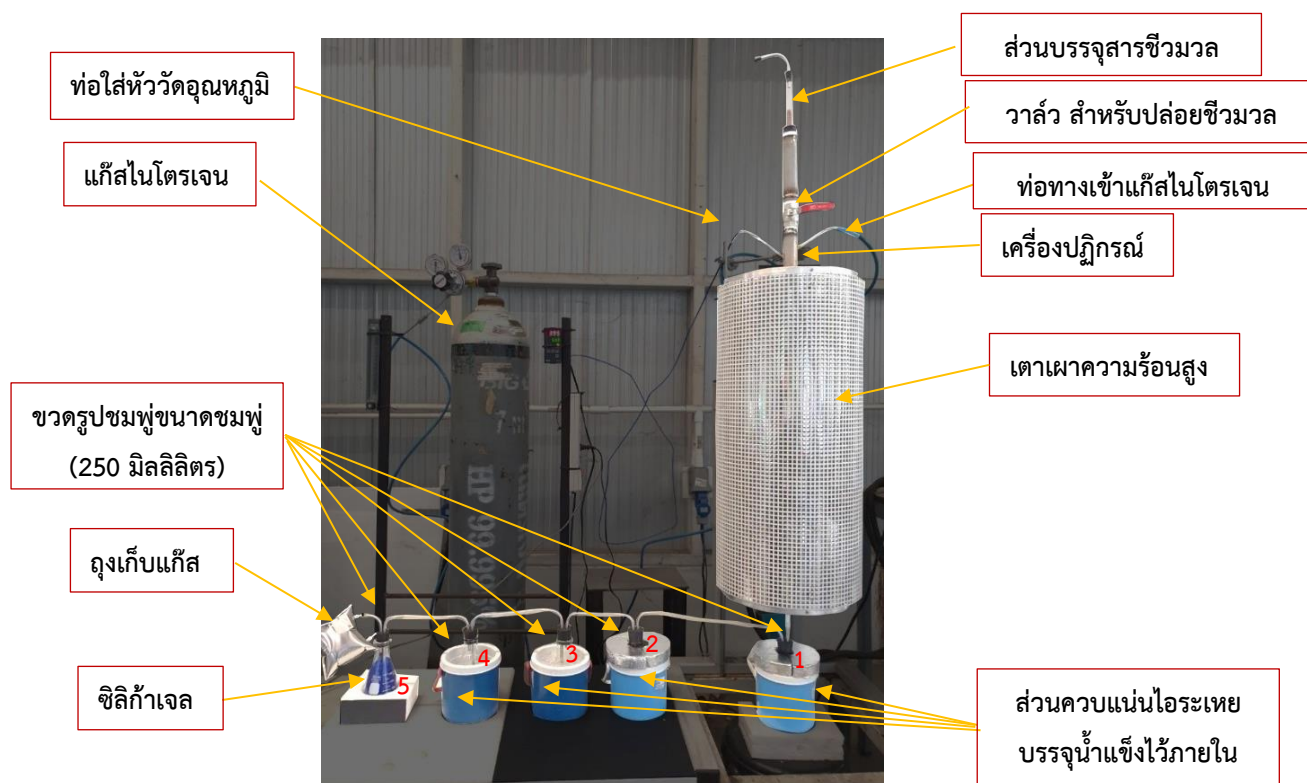
เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับไพโรไลซิส
2. เตาเผาความร้อนสูง (Muffle Furnace)
3. เลื่อยไฟฟ้า
4. ตะแกรงร่อน (Test Sieve)
5. ตู้อบ (Oven)
6. เครื่องวัดความชื้น (Moisture Meter)



รูป 3.1 แผนภาพองค์ประกอบเครื่องไพโรไลซิส [22]



รูป 3.2 เครื่องไฟโรไลซิสสำหรับงานวิจัย

จาก รูป 3.1 และ 3.2 แสดงแบบภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed-Bed Reactor) ที่ใช้ในการไฟโรไลซิสแบบเร็ว ประกอบไปด้วย 5 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนบรรจุชีวมวล ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนให้ความร้อน ส่วนควบแน่นไอรระเหย และส่วนบรรจุแก๊ส ซึ่งส่วนแรกคือส่วนบรรจุชีวมวลวัสดุเป็นหลอดแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 เซนติเมตร และส่วนบนเป็นจุกยางที่ต่อกับท่อโลหะขนาดเล็กเพื่อให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้ามาเพื่อไล่อากาศที่อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมชีวมวล ซึ่งส่วนหลอดแก้วต่อกับท่อโลหะที่มีวาล์วเปิด-ปิด เพื่อให้ชีวมวลสามารถตกลงไปยังส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ได้ รวมความยาวทั้งหมดของส่วนบรรจุชีวมวล 42 เซนติเมตร ส่วนที่สองคือส่วนเครื่องปฏิกรณ์วัสดุที่ใช้เป็นท่อโลหะ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 เซนติเมตร ประกอบด้วยท่อขนาดเล็ก 2 ท่อ ทางด้านข้างเครื่องปฏิกรณ์ใช้สำหรับใส่หัววัดอุณหภูมิและต่อแก๊สไนโตรเจนเข้าไปยังตัวเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งภายในประกอบไปด้วยแท่นเหล็กวงกลมที่มีช่องว่างกระจายตัวอยู่สม่ำเสมอทำให้แก๊สสามารถไหลผ่านได้และเพื่อใช้ใส่เซรามิกไฟเบอร์ซึ่งรองรับชีวมวลที่ตกลงมาจากส่วนด้านบน ส่วนที่สามคือ ส่วนให้ความร้อน เป็นเตาเผาความร้อนสูง (Muffle Furnace) ซึ่งให้อุณหภูมิสูงสุดถึง 1,000 องศาเซลเซียส ส่วนที่สี่ส่วนควบแน่นไอรระเหยโดยอาศัยการลดอุณหภูมิโดยใช้น้ำแข็ง ประกอบไปด้วยขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด ขวดที่ 1 และ 3 เป็นส่วนที่ใช้บรรจุและควบแน่นไอรระเหยให้กลายเป็นของเหลวที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จากการไฟโรไลซิส ส่วนขวดที่ 4 บรรจุไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เพื่อดักจับไอรระเหยที่ยังไม่ควบแน่นบางส่วน เพื่อไม่ให้ปนไปกับแก๊สที่ต้องการนำไปวิเคราะห์ และขวดที่ 5

บรรจุซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นของแก๊สที่ได้ก่อนเข้าถังกักเก็บแก๊ส และส่วนสุดท้ายส่วนที่ห้า ส่วนบรรจุแก๊สซึ่งเป็นถังกักเก็บแก๊สที่มีวาล์ว เปิด-ปิด เพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สหรืออากาศภายนอกเข้าไปยังถังกักเก็บแก๊สได้

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7820A ใช้วิเคราะห์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส มีดีเทคเตอร์คือ Thermal Conductivity Detector (TCD) วิเคราะห์แก๊สจำพวกคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไนโตรเจน (N_2) และมีเทน (CH_4) เป็นต้น และ Flame Ionization Detector (FID) ใช้วิเคราะห์แก๊สจำพวก อีเทน (C_2H_6) เอทิลีน (C_2H_4) โพรเพน (C_3H_8) เป็นต้น



รูป 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-TCD)

2. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatography Mass Spectrometer, GC-MS) ยี่ห้อ Agilent เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น 7890 และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น 5975C inert XL MSD, คอลัมน์ชนิด Capillary ยี่ห้อ J&W scientific รุ่น HP-5MS ขนาด 30 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้



รูป 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)

3. เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN (CHN analysis) ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN628 ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพ และตัวอย่างไม้ไผ่



รูป 3.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN (CHN analysis)

5. เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 ใช้วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ และตัวอย่างไม้ไผ่



รูป 3.6 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter)

3.3 ชีวมวลและสารเคมี

1. ไม้ไผ่กิมซุงสดอายุ 6-7 ปี เพื่อให้ขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของลำไม้ไผ่ใกล้เคียงกัน จากสวนไผ่ชางหม่น-ไผ่กิมซุง ต.ชะอม อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

2. แก๊สไนโตรเจนร้อยละ 99.995

3. อะซิโตน (Acetone) เกรดวิเคราะห์ (AR)

4. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (iso propyl alcohol) เกรดการค้า (CG) สำหรับดักจับไอระเหยที่ยังไม่ควบแน่นบางส่วนจากการไพโรไลซิส เพื่อลดการปนไปกับแก๊สที่จะนำไปวิเคราะห์

5. เซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic fiber) สำหรับรองรับชีวมวลเพื่อป้องกันไม่ให้ร่วงลงไปในส่วนควบแน่นไอระเหย

6. กระจกกรอง เบอร์ 40

7. ถุงเก็บแก๊ส



รูป 3.7 ไม้ไผ่กิมซุงอายุ 6-7 ปี

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมชีวมวลและวิเคราะห์สมบัติชีวมวล

1. นำไม้ไผ่กิมซุงสด ความยาว 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 – 8 เซนติเมตร มาผ่านการเลื่อยด้วยเลื่อยไฟฟ้าให้มีขนาดชิ้นเล็กๆ เพื่อให้ได้ชิ้นเลื่อย เนื่องจากไม่มีเครื่องย่อยเศษไม้

2. นำชีวมวลที่เป็นชิ้นเลื่อยมาร่อนในตะแกรงร่อนขนาด 0.25 0.50 0.71 1.18 และ 2.00 มิลลิเมตร

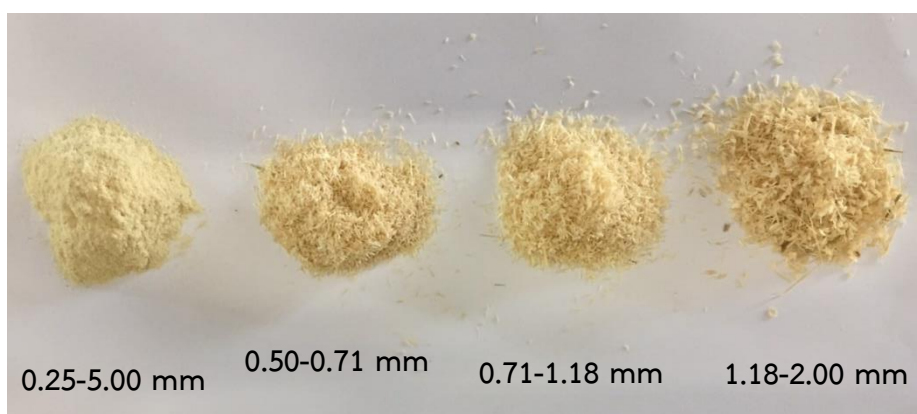
3. แบ่งขนาดอนุภาค 5 ช่วงคือ 0.25-0.50 0.50-0.71 0.71-1.18 1.18-2.00 และ น้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร

4. นำชีวมวลที่ได้เข้าตู้อบเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำชีวมวลมาพักไว้ที่กล่องดูดความชื้น

6. เก็บรักษาชีวมวลที่ผ่านการบดและแยกขนาดอนุภาคแล้วไว้ในกล่องดูดความชื้นตลอดเวลา

7. นำชีวมวลที่มีขนาดต่ำกว่า 0.25 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยวิธีประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาปริมาณสารระเหย ถ้ำ คาร์บอนคงตัว และความชื้น และวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณ คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ และค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์



รูป 3.8 ไม้ไผ่กิมซุง 4 ช่วงขนาดอนุภาคหลังผ่านการอบที่ใช้ในการทดลอง

3.4.2 การออกแบบการทดลอง

1. ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ไผ่

1.1 ศึกษาอุณหภูมิที่ 400 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยภาวะที่ใช้ศึกษาคือ เวลาที่ 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 120 มิลลิลิตรต่อนาที

1.2 ศึกษาขนาดของอนุภาคระหว่าง 0.25-0.50 0.50-0.71 0.71-1.18 และ 1.18-2.00 มิลลิลิตร โดยภาวะที่ใช้ศึกษาคืออุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ 1.1 เวลาที่ 30 นาที และอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 120 มิลลิลิตรต่อนาที

1.3 ศึกษาอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่ 40 80 120 และ 160 มิลลิลิตรต่อนาที โดยภาวะที่ใช้ศึกษาคืออุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ 1.1 และขนาดอนุภาคจากข้อที่ 1.2 เวลาที่ 30 นาที

2. การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

2.1 วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง

วิเคราะห์ธาตุ CHN

2.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตร

มิเตอร์ (GC-MS)

2.4 วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-FID/TCD)

2.5 บันทึกน้ำหนักของถ่านชาร์ที่ได้

3.4.3 การไพโรไลซิสชีวมวล

1. ชั่งน้ำหนักชีวมวล 4 กรัม จากนั้นเทใส่ส่วนบรรจุชีวมวลรูป 3.1 และไล่อากาศออกด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 5 นาที ด้วยอัตราไหลของแก๊สที่มากที่สุด

2. ใส่เซรามิกไฟเบอร์ลงในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อกันชีวมวลไม่ให้ร่วงลงไปในส่วนควบแน่นไอระเหย ปรับอัตราไหลไนโตรเจนเป็น 120 มิลลิลิตรต่อนาที และตั้งอุณหภูมิตามที่ออกแบบไว้

3. ประกอบส่วนบรรจุชีวมวลกับส่วนเครื่องปฏิกรณ์ใส่เข้าไปในเตาเผา (furnace) เมื่ออุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นต่อเข้าส่วนควบแน่นไอระเหย

4. ต่อแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศออกจากเครื่องปฏิกรณ์และส่วนควบแน่นจนกว่าอุณหภูมิจะถึงตามที่กำหนดไว้ ใช้เวลาประมาณ 50-60 นาที แล้วแต่อุณหภูมิที่จะทำการทดลองในครั้งนั้นๆ

5. เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนด ให้เปิดวาล์วในส่วนบรรจุชีวมวล เพื่อให้ชีวมวลตกลงมาในเครื่องปฏิกรณ์และเริ่มทำการจับเวลา 30 นาที

6. เริ่มเก็บแก๊สเมื่อเริ่มปฏิกิริยาไพโรไลซิสไปแล้ว 3 นาที

7. เมื่อครบเวลาทำปฏิกิริยาปิดส่วนให้ความร้อน แล้วเก็บส่วนควบแน่นไอระเหยที่มีน้ำมันชีวภาพอยู่ แล้วต่อท่ออย่างแทนในส่วนขาออกของไอระเหยจากเครื่องปฏิกรณ์ลงไปที่ขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำ เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหรืออากาศไหลสวนเข้าไปภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดถ่ายคาร์ที่ได้กลายเป็นเถ้า รอให้อุณหภูมิส่วนเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิลดลงและยังคงเปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าไปที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ตลอดเวลา

8. เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เย็นตัวแล้ว ถอดส่วนของที่บรรจุชีวมวลออก เพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่านชาร์)

9. นำผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่านชาร์) และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เก็บได้จากส่วนควบแน่นไอระเหย มาชั่งน้ำหนัก จากนั้นชะด้วยอะซิโตนใส่ขวดที่ชั่งน้ำหนักแล้ว และชะสารที่ติดอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอะซิโตนใส่ขวดที่ชั่งน้ำหนักแล้วเช่นกัน

10. นำของเหลวที่ได้จากการควบแน่นไอระเหยและที่ได้จากการชะในเครื่องปฏิกรณ์ไปทำการระเหยอะซิโตนออกอุณหภูมิ 40 – 50 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสารทั้งสองขวดไปชั่งน้ำหนัก โดยผลต่างระหว่างน้ำหนักขวดเปล่าและน้ำหนักสารหลังระเหยอะซิโตนออกจะเป็นส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลว

11. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งสามสถานะไปวิเคราะห์ต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ไผ่กิมซุง

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของไม้ไผ่กิมซุงหลังอบ

ตารางที่ 4.1 เป็นการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของไม้ไผ่กิมซุงหลังอบพบว่ามีองค์ประกอบเรียงจากมากที่สุด ได้แก่ สารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้น และ เถ้า มีปริมาณร้อยละ 76.44 14.11 6.46 และ 2.99 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับไม้ไผ่ (Bingbing Mi. และคณะ. 2559.) อายุ 4 ปี จากมณฑลเจ้อเจียง ประเทศจีน พบว่ามีปริมาณของสารระเหยที่น้อยกว่า ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัว ความชื้น และเถ้า มีปริมาณที่มากกว่า อันเนื่องมาจากอายุไม้ไผ่ที่แตกต่างกันและอาจเป็นไม้ไผ่คนละชนิด และเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคา (วรเวช ศรีปราโมช. 2562.) พบว่า สารระเหย และ เถ้า มีปริมาณที่มากกว่า ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัว และ ความชื้น มีปริมาณที่น้อยกว่า

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของไม้ไผ่กิมซุงหลังอบเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

คุณสมบัติ	งานวิจัยนี้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม้ไผ่ ^ก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม้ยูคา ^ข (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ความชื้น	6.46	6.23	7.52
เถ้า	2.99	1.66	0.53
สารระเหย	76.44	84.06	72.60
คาร์บอนคงตัว*	14.11	8.05	19.36

*ผลต่างร้อยละของความชื้น,เถ้าและสารระเหย

^ก Bingbing Mi. และคณะ. (2559).

^ข วรเวช ศรีปราโมช. (2562).

4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของไม้ไผ่กิมซุงหลังอบ

ตารางที่ 4.2 เป็นการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของไม้ไผ่กิมซุงหลังอบ พบว่ามีองค์ประกอบเป็น คาร์บอนร้อยละ 45.78 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 6.58 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และ ออกซิเจนร้อยละ 47.39 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อน 17.33 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ ไม้ไผ่ (Bingbing Mi. และคณะ. 2559.) พบว่ามีปริมาณของคาร์บอนที่น้อยกว่า ในขณะที่ปริมาณ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน มีปริมาณที่มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคา (วรเวช

ศรีปราโมช. 2562.) พบว่า ปริมาณคาร์บอน และ ไฮโดรเจน มีปริมาณที่น้อยกว่า ในขณะที่ปริมาณ ไนโตรเจน และ ออกซิเจน มีปริมาณที่สูงกว่า เมื่อพิจารณาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) พบว่าในไม้ไผ่กิมซุงมีค่ามากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนที่มีปริมาณต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น แต่ถือได้ว่าไม่ได้แตกต่างกันมาก

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของไม้ไผ่กิมซุงหลังอบเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

คุณสมบัติ	งานวิจัยนี้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม้ไผ่ ^ก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม้ยูคา ^ข (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ			
คาร์บอน (C)	45.78	49.59	46.41
ไฮโดรเจน (H)	6.58	5.56	6.61
ไนโตรเจน (N)	0.25	0.14	0.14
ออกซิเจน* (O)	47.39	44.71	46.85
ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) (โมล/โมล)	1.72	1.35	1.71
ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) (โมล/โมล)	0.78	0.68	0.76
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	17.33	18.52	17.61

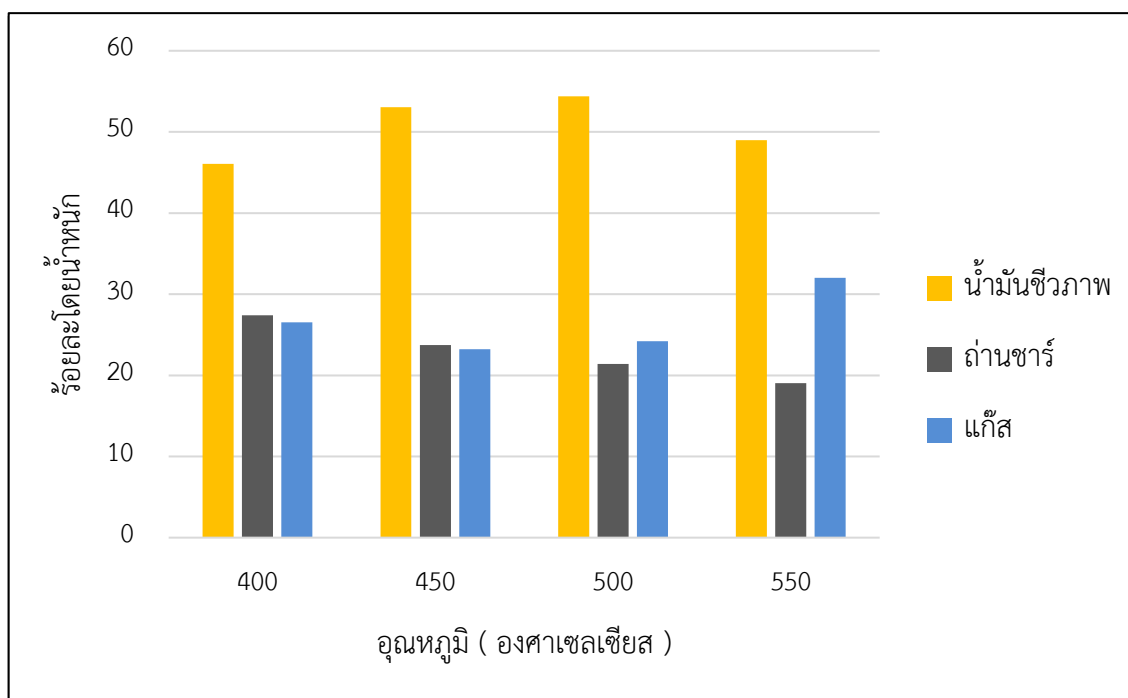
*ผลต่างร้อยละของธาตุอื่น

^ก Bingbing Mi. และคณะ. (2559).

^ข วรเวช ศรีปราโมช. (2562).

4.2 ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบตนิ่งของไม้ไผ่กิมซุง

4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง



รูป 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

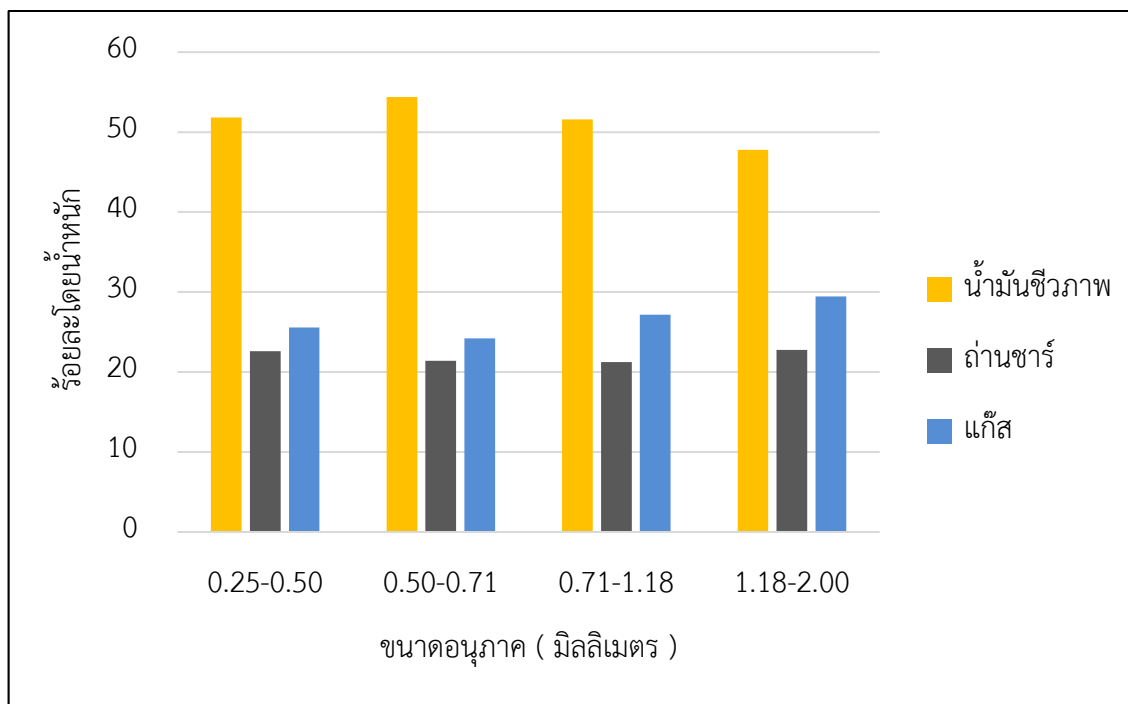
(ที่ ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที)

จากผลการศึกษาผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงที่ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร เวลา 30 นาที อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส จนถึง 500 องศาเซลเซียส ได้ผลของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 46.06 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 54.37 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ผลของแก๊สลดลงจากร้อยละ 26.55 โดยน้ำหนัก เป็น 24.22 โดยน้ำหนัก และผลของถ่านชาร์ลดลงจากร้อยละ 27.39 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 21.41 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 550 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำมันชีวภาพมีปริมาณลดลง ผลได้แก๊สเพิ่มขึ้น และผลของถ่านชาร์ลดลงอย่างคงที่ ดังรูป 4.1

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีผลโดยตรงกับปริมาณผลิตภัณฑ์ หากอุณหภูมิต่ำ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็นถ่านชาร์ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการสลายตัวสองขั้น คือ ปฐมภูมิ (primary cracking) และทุติยภูมิ (Secondary cracking) [12,13] ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์หลักจะเป็นน้ำมันชีวภาพ แต่ในทางกลับกันหากอุณหภูมิสูงเกินกว่า 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์แก๊สจะเพิ่มสูงขึ้นแต่น้ำมันชีวภาพจะลดลง ซึ่งเกิดจากการสลายตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary

cracking) ของไอระเหยที่เพิ่มมากขึ้นเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง คือ 500 องศาเซลเซียส และจะใช้ในการศึกษาตัวแปรตัวถัดไป

4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง



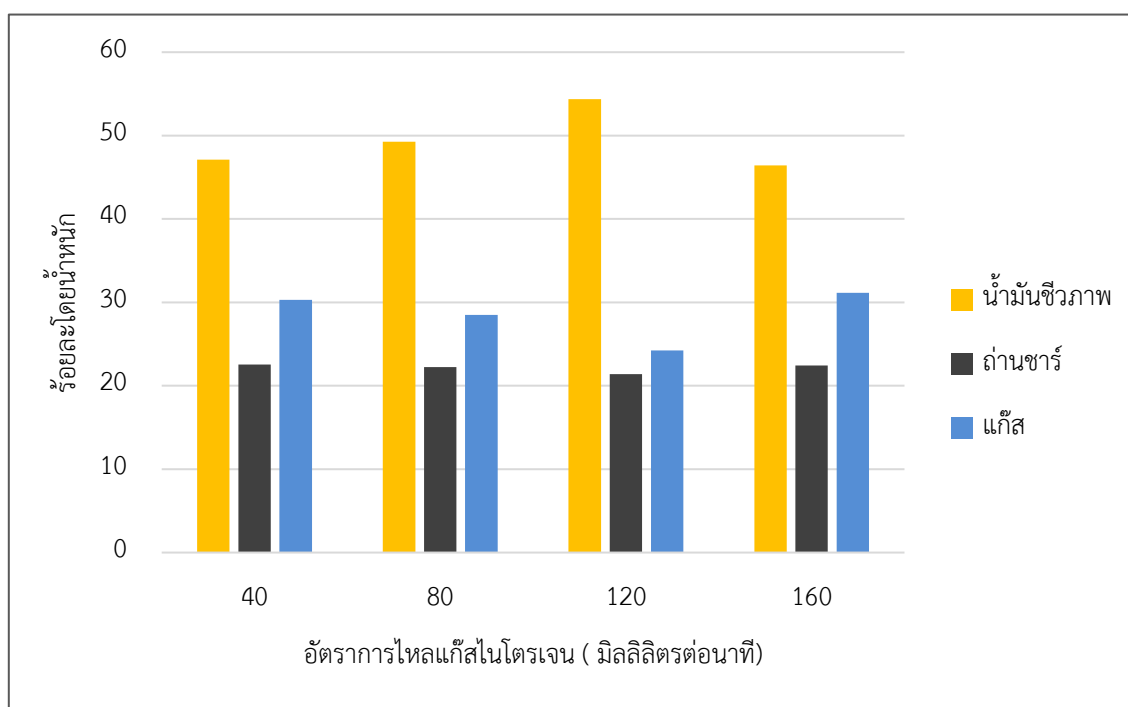
รูป 4.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง (ที่ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที)

จากผลการศึกษาผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดของการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงคือ ร้อยละ 54.37 โดยน้ำหนัก ที่ขนาด 0.50-0.71 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.50 มิลลิเมตร ของการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงดังรูป 4.2 พบว่าน้ำมันมีปริมาณลดลง แก๊สและถ่านชาร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะอนุภาคที่เล็กเกินไปจะเปลี่ยนเป็นไอระเหยกลายเป็นแก๊สได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ได้แก๊สเพิ่มขึ้นและน้ำมันชีวภาพลดลง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer coefficient) มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ และเมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 0.71 มิลลิเมตร พบว่าไม้ไผ่กิมซุงจะให้ผลของน้ำมันชีวภาพลดลง ในขณะที่แก๊สและถ่านชาร์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนไปยังพื้นที่ผิวด้านในของชีวมวลช้าลง ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนต่ำและปฏิกิริยาการสลายตัวลดลง แต่เมื่อสังเกตจะพบว่าขนาดอนุภาค 0.71-1.18 และ 1.18-2.00 มิลลิเมตร ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มากกว่าช่วงขนาดที่เล็กกว่า อันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ของไม้ไผ่กิมซุง มีการอัดตัวกันในลักษณะ

ที่ไม่หนาแน่นมากนักเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าที่มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่ดีกว่า จึงทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีขึ้นไปยังช่องว่างระหว่างอนุภาค ส่งผลให้เกิดการสลายตัวชั้นแรกแล้วสลายตัวต่อไปยังชั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) ได้รวดเร็วมาก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น จากข้อผลการทดลองกล่าวขนาดของอนุภาคที่ให้ผลของน้ำมันชีวภาพสูงสุดของการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงคือ 0.50-0.71 มิลลิเมตร

4.2.3 ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส

ไม้ไผ่กิมซุง



รูป 4.3 ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง (ที่ ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร 500 องศาเซลเซียส)

จากผลการศึกษาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 30 พบว่า ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดของการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงคือ ร้อยละ 54.37 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิตรต่อนาที เมื่อพิจารณาอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่ 40 ถึง 120 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูป 4.3 พบว่าน้ำมันชีวภาพมีปริมาณเพิ่มขึ้น แก๊สมีปริมาณลดลงและถ่านชาร์มีปริมาณที่ไม่เปลี่ยนแปลง และที่อัตราการไหลที่ 120 ถึง 160 มิลลิเมตรต่อนาที มีปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลง ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นและถ่านชาร์มีปริมาณที่ไม่เปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นสามารถพาไอระเหยออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้รวดเร็วขึ้นไปยังส่วนควบแน่นไอระเหย จึงทำให้ไอระเหยนั้นไม่เกิดการสลายตัวชั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) กลายเป็นแก๊สที่ไม่สามารถ

ควบแน่นได้ แต่เมื่ออัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่มากเกินไป ส่งผลให้ไอรหรือนั้นไม่มีเวลามากพอต่อการควบแน่นจึงส่งผลให้มีปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลงและปริมาณของแก๊สที่เก็บได้เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่น้อยเกินไป ส่งผลให้ไอรหรือนอกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ช้าลง ทำให้ไอรหรือนั้นได้รับความร้อนในระยะเวลาที่มากขึ้น ส่งผลให้ไอรหรือนเกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) จึงทำให้เกิดแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง ใช้ชีวมวลเริ่มต้น 4 กรัม พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพร้อยละ 54.37 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ร้อยละ 21.41 โดยน้ำหนัก และ แก๊สร้อยละ 24.22 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์กับไม้ยูคาและซังข้าวโพดในเครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียวกัน (วรเวช ศรีปราโมช. 2562.) ที่ใช้ชีวมวลเริ่มต้น 7 กรัม โดยได้สภาวะที่เหมาะสมในไม้ยูคาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และที่สภาวะเหมาะสมในซังข้าวโพดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าร้อยละของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ไผ่กิมซุงนั้นมากกว่าซังข้าวโพดแต่น้อยกว่าไม้ยูคา ถ่านชาร์มีปริมาณร้อยละที่น้อยกว่าทั้งยูคาและซังข้าวโพด ส่วนแก๊สที่ได้มีปริมาณร้อยละที่มากกว่าไม้ยูคาและซังข้าวโพด เมื่อพิจารณาที่ปริมาณร้อยละของแก๊สที่ได้จากไม้ไผ่กิมซุงนั้นสูงกว่ามากทั้งไม้ยูคาและซังข้าวโพด จึงตั้งสมมติฐานได้ว่าเป็นผลมาจากชีวมวลเริ่มต้นของไม้ไผ่กิมซุงที่น้อยกว่าในไม้ยูคาและซังข้าวโพด ส่งผลให้เวลาที่ใช้เกิดปฏิกิริยาที่มากเกินไป ไม่สอดคล้องกับชีวมวลเริ่มต้น จึงทำให้ไอรหรือนสลายตัวต่อไปยังขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) กลายเป็นแก๊สที่ไม่ควบแน่นมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดกับงานวิจัยที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งเครื่องเดียวกัน

ผลิตภัณฑ์	งานวิจัยนี้* (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม้ยูคา [†] ** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ซังข้าวโพด [†] ** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
น้ำมันชีวภาพ	54.37	57.49	52.53
ถ่านชาร์	21.41	22.48	24.53
แก๊ส	24.22	20.03	22.94
รวม	100	100	100

[†] วรเวช ศรีปราโมช. (2562).

* น้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น 4 กรัม , ** น้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น 7 กรัม

ตารางที่ 4.4 แสดงผลได้ของผลิตภัณฑ์ในไม่ไฟกิมซุงกับงานวิจัยที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระ (Free-fall Reactor) พบว่าที่เครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง น้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น 4 กรัม อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที และระยะเวลาไฟโรไลซิส 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพร้อยละ 54.37 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ร้อยละ 21.41 โดยน้ำหนัก แก๊สร้อยละ 24.22 โดยน้ำหนักน้ำ และ มันชีวภาพมีค่าความร้อน 23.93 เม-กะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์การไฟโรไลซิสไม่ไฟกิมซุงในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระ (นฤมล ภาณุภา. และคณะ.) ที่ น้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น 100 กรัมต่อชั่วโมง ขนาด 0.21-0.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 4 ลิตรต่อนาที และระยะเวลาไฟโรไลซิส 1 ชั่วโมง พบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพร้อยละ 49.30 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ร้อยละ 21.21 โดยน้ำหนัก แก๊สร้อยละ 29.49 โดยน้ำหนัก และ มันชีวภาพมีค่าความร้อน 22.37 เม-กะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซิสไม่ไฟกิมซุงในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดพบว่า มีอุณหภูมิเดียวกันที่ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสนั้น ไม่ไฟกิมซุงสามารถแตกสลายตัวทางความร้อนได้ดีในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณถ่านชาร์ที่ได้ในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะพบว่าวิธีการไฟโรไลซิสไม่ไฟกิมซุงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพและค่าความร้อนมากกว่าในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระ อันเนื่องมาจาก วิธีการไฟโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งนั้น แก๊สตัวพาเคลื่อนที่ผ่านชีวมวลทำหน้าที่เป็นเบตอยู่กับที่ ซึ่งทำให้ได้รับความร้อนที่ค่อนข้างจะคงที่แก่ส่วนที่เป็นเบตอยู่ตลอดเวลาในการทำปฏิกิริยา ทำให้ชีวมวลเกิดการแตกสลายเชิงความร้อนได้เป็นไอไฟโรไลซิสได้ดีกว่าแบบเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระ ที่ต้องอาศัยการปล่อยชีวมวลลงมาเพื่อรับความร้อน ทำให้ความร้อนที่ได้รับนั้นอาจจะยังไม่เพียงพอต่อการเป็นไอไฟโรไลซิสที่สภาวะที่กล่าวมาข้างต้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ อีกหนึ่งปัจจัยคือเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระนั้นใช้อัตราการไหลแก๊สตัวพา (แก๊สไนโตรเจน) ค่อนข้างสูง จึงทำให้ปริมาณไอระเหยที่เกิดจากการไฟโรไลซิสมีระยะเวลาการควบแน่นไม่มากพอในส่วนควบแน่นเป็นน้ำมันชีวภาพ จึงส่งผลให้ปริมาณแก๊สที่ได้จากการไฟโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระนั้นมากกว่าในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง ทั้งนี้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาตรของตัวเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์ในไม่ไผ่กิมซุงกับงานวิจัยที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระ (Free-fall Reactor)

ผลิตภัณฑ์	งานวิจัยนี้* (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ไผ่กิมซุง [†] ** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
น้ำมันชีวภาพ	54.37	49.30
ถ่านชาร์	21.41	21.21
แก๊ส	24.22	29.49
รวม	100	100
ค่าความร้อนน้ำมันชีวภาพ (เมกะจูล/กิโลกรัม)	23.93	22.37

[†] นฤมล ภาณุนำภา. และคณะ.

* เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง น้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น 4 กรัม ขนาด 0.50-0.71 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลาไพโรไลซิส 30 นาที

** เครื่องปฏิกรณ์ชนิดตกอิสระ น้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น 100 กรัมต่อชั่วโมง ขนาด 0.21-0.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 4 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาไพโรไลซิส 1 ชั่วโมง

4.3 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม่ไผ่กิมซุง

4.3.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพ

4.3.1.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม่ไผ่กิมซุง

จากตารางที่ 4.4 เป็นการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม่ไผ่กิมซุง พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบเป็น คาร์บอนร้อยละ 59.83 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 7.04 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.23 โดยน้ำหนัก และ ออกซิเจนร้อยละ 32.90 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) เป็น 1.41 และ 0.41 ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนที่ได้ลดลงเมื่อเทียบกับตอนเป็นชีวมวลเริ่มต้น แสดงถึงปริมาณของคาร์บอนเพิ่มขึ้นและปริมาณออกซิเจนลดลง สอดคล้องกับผลของค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 17.33 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เป็น 23.93 เมกะจูลต่อกิโลกรัม อีกทั้งค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้นั้นมีปริมาณที่สูงกว่า

ในน้ำมันชีวภาพจากไม้ยูคา อันเป็นผลมาจากอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

คุณสมบัติ	งานวิจัยนี้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม้ยูคา ^ก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ		
คาร์บอน (C)	59.83	56.47
ไฮโดรเจน (H)	7.04	6.84
ไนโตรเจน (N)	0.23	0.23
ออกซิเจน* (O)	32.90	36.46
ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) (โมล/โมล)	1.41	1.45
ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) (โมล/โมล)	0.41	0.48
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	23.93	23.14

*ผลต่างร้อยละของธาตุอื่น

^ก วรเวช ศรีปราโมช. (2562).

4.3.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

จากตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง ด้วยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งสามารถจำแนกองค์ประกอบที่พบในน้ำมันชีวภาพได้ 8 กลุ่มตามหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids) แอลดีไฮด์ (Aldehyde) ฟิวแรน (Furans) อีเทอร์ (Ethers) คีโตน (Ketones) ฟีนอล (Phenols) ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และ แซ็กคาไรด์ (saccharide) พบว่าองค์ประกอบหลักที่พบมากที่สุดในน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง ได้แก่ สารในกลุ่ม ฟีนอล (Phenols) ร้อยละ 46.10 ซึ่งเกิดจากการดีโพลีเมอร์ไรเซชัน (Depolymerisation) ของลิกนิน [15] รองลงมาคือสารในกลุ่ม คีโตน (Ketones) ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และ อีเทอร์ (Ethers) ที่มีปริมาณร้อยละ 17.46 16.72 และ 6.70 ตามลำดับ นอกจากนี้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลถูกย่อยสลายเป็นกลูโคปีรานอส (Glucopyranoses) และสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก เช่น ฟิวแรน (Furan) อนุพันธ์

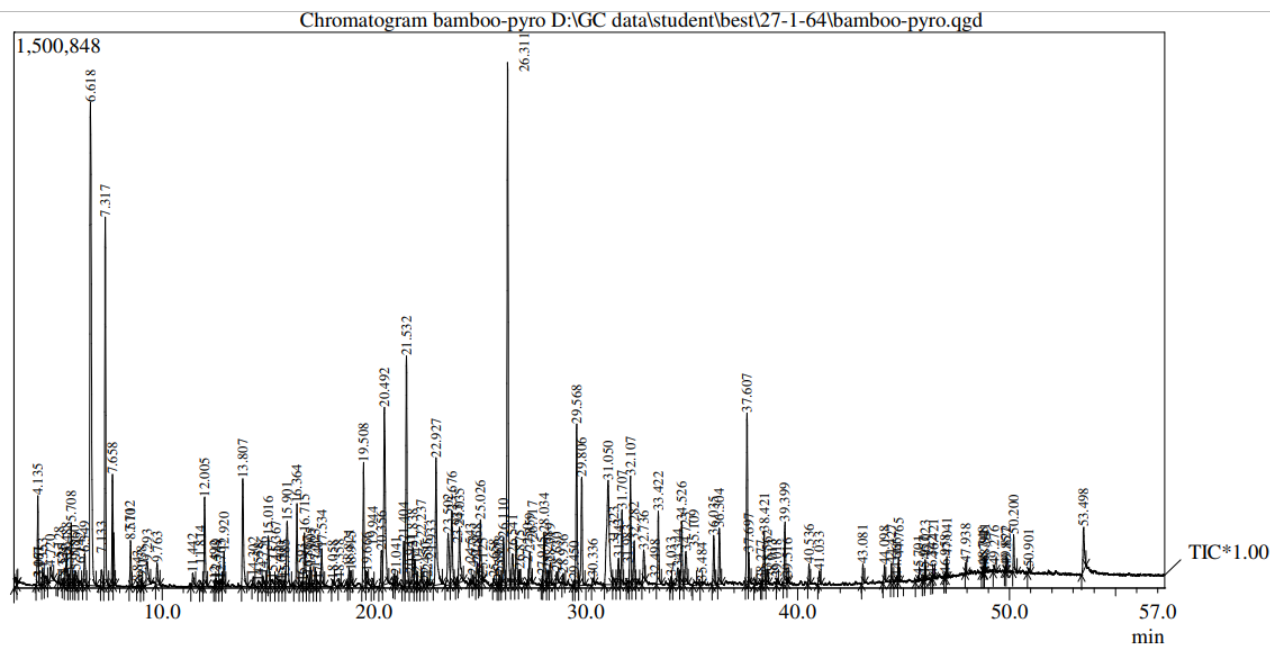
ของฟูแรน (Furan derivatives) และ กรดอะซิติก ซึ่งสารในกลุ่ม คีโตน (Ketones) ส่วนใหญ่เกิดจากการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสร่วมกับฟูแรน [12,13,14]

เมื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ยูคา พบว่าสามารถจำแนกองค์ประกอบที่พบตามหมู่ฟังก์ชันได้ 8 กลุ่มเช่นเดียวกัน และองค์ประกอบหลักที่พบมากที่สุดคือน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลทั้งสองคือ สารในกลุ่ม ฟีนอล (Phenols) ซึ่งน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่กิมซุงนั้นพบปริมาณของ ฟีนอล (Phenols) ได้น้อยกว่าในน้ำมันชีวภาพจากไม้ยูคาอยู่ร้อยละ 5 อันเนื่องมาจากองค์ประกอบของลิกนินมีปริมาณของหมู่เมทอกซิลในไม้เนื้ออ่อนซึ่งก็คือไม้ไผ่กิมซุง มีปริมาณของหมู่เมทอกซิลที่น้อยกว่าไม้เนื้อแข็งซึ่งก็คือไม้ยูคา ส่งผลให้เมื่อเกิดจากการสลายตัวของเมทอกซิลในลิกนินได้เป็นสารกลุ่มฟีนอล (Phenols) [14] จึงทำให้พบสารในกลุ่มดังกล่าวในน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่กิมซุงได้น้อยกว่าไม้ยูคา และปริมาณของแต่ละกลุ่มตามหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันในน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่และไม้ยูคา อันเป็นผลมาจากองค์ประกอบ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ของชีวมวลทั้งสองที่แตกต่างกัน จึงส่งผลต่อปริมาณขององค์ประกอบที่พบ

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

องค์ประกอบ	งานวิจัยนี้ (ร้อยละ)	ไม้ยูคา ¹ (ร้อยละ)
กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids)	1.51	4.70
แอลดีไฮด์ (Aldehyde)	3.14	9.00
ฟูแรน (Furans)	5.63	3.03
อีเทอร์ (Ethers)	6.60	7.38
คีโตน (Ketones)	18.72	9.41
ฟีนอล (Phenols)	45.39	50.39
ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)	16.46	5.96
แซ็กคาไรด์ (Saccharide)	2.54	10.11
รวม	100	100

¹ วรเวช ศรีปราโมช. (2562).



รูป 4.4 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของแก๊ส

4.3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

จากผลการศึกษารายละเอียดของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง จากตารางที่ 4.6 พบว่าองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 47.28 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ร้อยละ 46.67 และยังพบสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ คาร์บอนหนึ่งถึงสี่อะตอม ($\text{C}_1\text{-C}_4$) โดยสารที่พบมากที่สุดคือ มีเทน (CH_4) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงเทียบกับไม้ยูคา พบว่ามีองค์ประกอบโดยรวมที่คล้ายกันในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ต่างที่องค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากไม้ไผ่กิมซุงนั้นพบ ไอโซบิวเทน (C_4H_{10}) และไนไมยูคาพบโพรพิลีน (C_3H_6) เมื่อพิจารณาแล้วถือว่ามีส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบหลักที่คล้ายกัน

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สจากการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงด้วยเทคนิคแก๊ส

โครมาโทกราฟี (GC)

องค์ประกอบ	งานวิจัยนี้ (ร้อยละ)	ไม้ยูคา ^ก (ร้อยละ)
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	47.28	46.12
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	46.67	44.91
มีเทน (CH ₄)	4.36	6.62
อีเทน (C ₂ H ₆)	0.57	0.59
เอทิลีน (C ₂ H ₄)	0.88	1.18
โพรเพน (C ₃ H ₈)	0.13	0.11
ไอโซบิวเทน (C ₄ H ₁₀)	0.10	-
โพรพิลีน (C ₃ H ₆)	-	0.46
รวม	100	100

^ก วรเวช ศรีปราโมช. (2562).

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลองการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ไผ่กิมซุงที่มีอายุ 5-7 ปี ด้วยวิธีการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ไผ่กิมซุง

จากการวิเคราะห์แบบประมาณพบว่าไม้ไผ่กิมซุงประกอบด้วยความชื้นร้อยละ 6.46 โดยน้ำหนัก แล้วยังมีคาร์บอนคงตัวร้อยละ 2.99 โดยน้ำหนัก คาร์บอนคงตัวร้อยละ 14.11 โดยน้ำหนัก และสารระเหยร้อยละ 76.44 โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่า ไม้ไผ่กิมซุงประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 45.78 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 6.58 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 47.39 โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อนของชีวมวลอยู่ที่ 17.33 เมกะจูล/กิโลกรัม

5.1.2 ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งของไม้ไผ่กิมซุง

การศึกษาตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรที่มีผลต่อการไพโรไลซิส คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ขนาดของอนุภาค และอัตราการไหลของไนโตรเจน พบว่า ภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงคือ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 54.37 โดยน้ำหนัก ผลได้แก๊สร้อยละ 24.22 โดยน้ำหนัก และผลได้ถ่านชาร์ร้อยละ 21.41 โดยน้ำหนัก

ในขณะที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ผลได้แก๊สมากที่สุดที่ร้อยละ 32.00 โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ผลได้ถ่านชาร์มากที่สุดที่ร้อยละ 27.39 โดยน้ำหนัก

5.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

จากการผลวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพ พบว่ามีสารในกลุ่มฟีนอลมากที่สุดร้อยละ 45.39 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือสารในกลุ่มคีโตนร้อยละ 18.72 โดยน้ำหนัก ไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 16.46 โดยน้ำหนัก อีเทอร์ร้อยละ 6.60 โดยน้ำหนัก พูแรนร้อยละ 5.63 โดยน้ำหนัก แอลดีไฮด์ร้อยละ 3.14 โดยน้ำหนัก

แซ็กคาไรด์ร้อยละ 2.54 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณน้อยสุดคือสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกร้อยละ 1.51 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จากการผลวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ พบว่ามีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 59.83 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.23 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 7.04 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 32.9 โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 23.93 เมกะจูล/กิโลกรัม โดยพบว่าปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลเริ่มต้นก่อนการทดลอง ในส่วนค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีค่าสูงขึ้นจากชีวมวลเริ่มต้นเช่นเดียวกัน

จากการศึกษาองค์ประกอบของแก๊สพบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 47.28 โดยน้ำหนัก คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 46.67 โดยน้ำหนัก และสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่หนึ่งถึงสามอะตอม ($C_1 - C_3$) อยู่ที่ร้อยละ 6.05 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) จากการศึกษาครั้งนี้ไม่พบแก๊สไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบจากถุงแก๊สที่เก็บมาระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส ดังนั้นควรศึกษาหาวิธีในการเก็บแก๊สหรือการวิเคราะห์ในรูปแบบอื่น เพื่อให้ได้ผลที่ชัดเจนมากขึ้น
- 2) จากการศึกษาองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพพบว่าไม่ไผ่กิมซุงมีองค์ประกอบของสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก เพื่อเป็นการยืนยันผลควรศึกษาหาค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพเพิ่มเติม
- 3) ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ
- 4) ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติม ซึ่งอาจเห็นผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส
- 5) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสจากไม่ไผ่กิมซุงที่มาจากแหล่งที่มาอื่นๆ

ภาคผนวก ก

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

โดยการคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์เหลว ถ่านชาร์ และแก๊ส จะแสดงดังสูตรต่อไปนี้

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์เหลว (%Liquid yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลว}}{\text{น้ำหนักชีวมวล}} \times 100$$

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของถ่านชาร์ (%Solid yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักถ่านชาร์}}{\text{น้ำหนักชีวมวล}} \times 100$$

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (%Gas yield)

$$= 100 - (\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว} + \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง})$$

ภาคผนวก ข

ผลจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

1. ผลของอุณหภูมิและขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

ตารางที่ ข-1 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงที่ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราไหล่แก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์	แก๊ส
400	46.06	27.39	26.55
450	53.04	23.74	23.22
500	54.37	21.41	24.22
550	48.98	19.02	32.00

ตารางที่ ข-2 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราไหล่แก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที

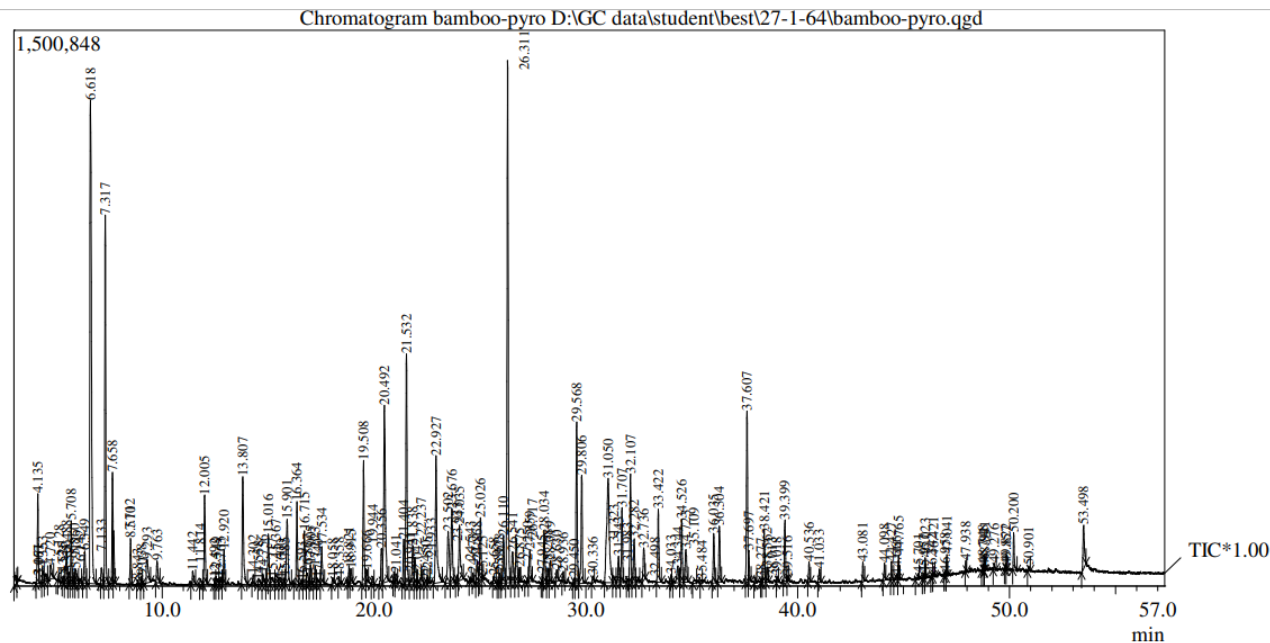
ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์	แก๊ส
0.25 - 0.50	51.83	22.60	25.57
0.50 - 0.71	54.37	21.41	24.22
0.71 - 1.18	51.59	21.24	27.17
1.18 - 2.00	47.78	22.77	29.45

ตารางที่ ข-3 ผลของอัตราไหล่แก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร

อัตราการไหล่แก๊ส ไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์	แก๊ส
40	47.13	22.55	30.32
80	49.27	22.25	28.48
160	54.37	21.41	24.22
180	46.42	22.43	31.15

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพ



รูป ค-1 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

ตารางที่ ค-1 องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ไผ่กิมซุง

ลำดับ	ชื่อสาร	เวลา	ร้อยละ	กลุ่มสาร
1	Toluene	4.133	1.53	HC
2	Acetic acid	5.708	1.06	CA
3	2-Pentanone	6.617	8.27	K
4	Ethylbenzene	7.317	6.30	HC
5	o-xylene	7.658	1.90	HC
6	p-xylene	7.708	0.89	HC
7	Phenol	12.008	1.53	Ph
8	1,2-Cyclopentanedione	13.808	1.84	K
9	2-methyl-phenol	15.017	0.86	Ph
10	4-methyl-phenol	15.900	1.12	Ph
11	2-methoxy-phenol	16.367	1.41	Ph
12	Cyclopropyl	16.717	0.91	HC
13	4-ethylphenol	19.508	2.11	Ph

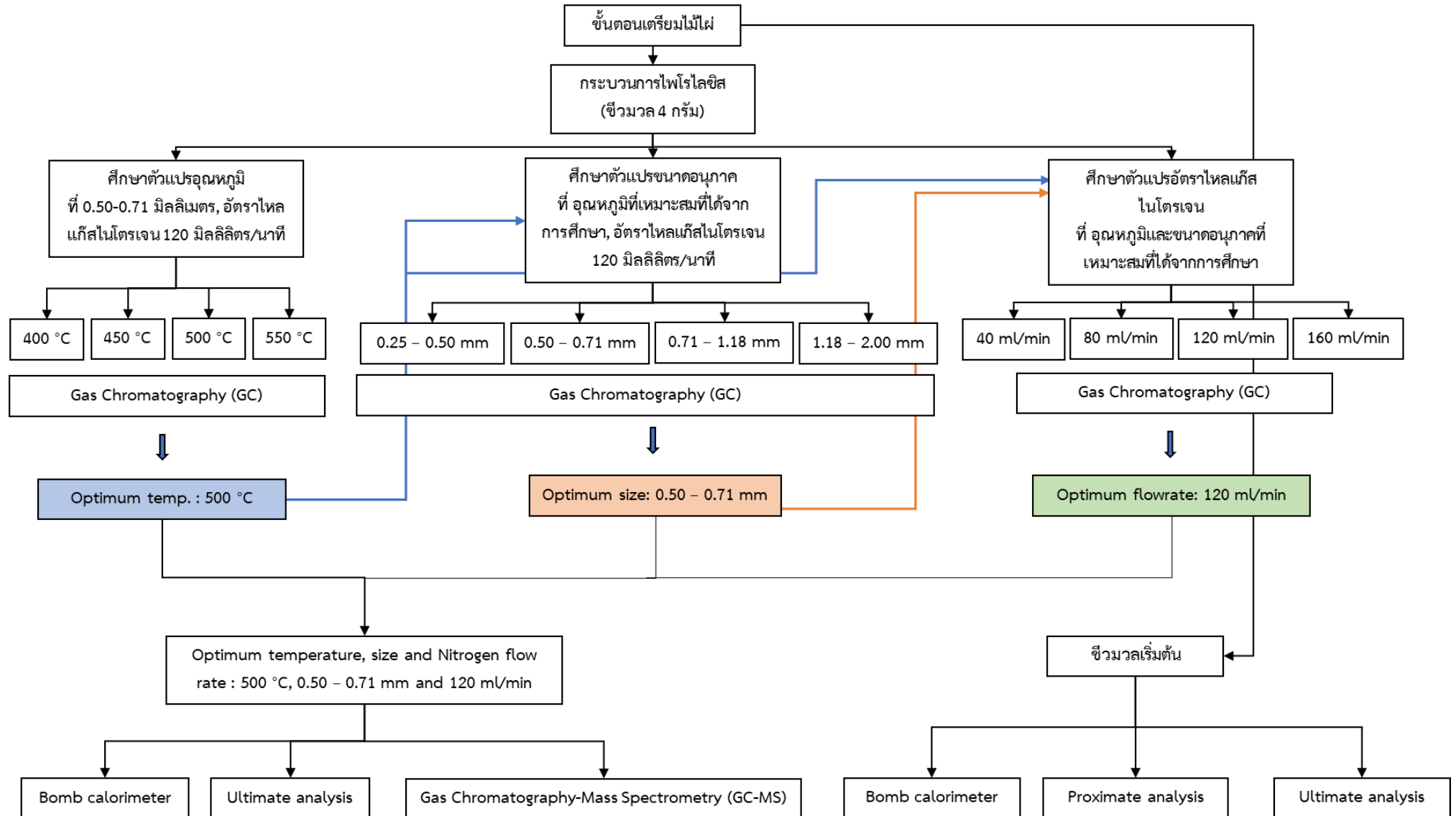
ลำดับ	ชื่อสาร	เวลา	ร้อยละ	กลุ่มสาร
14	1,2-Benzenediol	20.492	3.03	Ph
15	Benzofuran	21.533	3.94	F
16	1,2-benzenediol, 3-methyl-	22.925	2.18	Ph
17	Hydroquinone	23.500	0.88	Ph
18	1,2-Benzenediol, 4-methyl	24.033	0.95	Ph
19	4-Hydroxy-3-methylacetophenone	25.025	1.07	K
20	1,4-Benzenediol, 2-methyl	26.108	0.81	Ph
21	3,4-dimethoxyphenol	26.308	8.93	Ph
22	Vanillin	28.033	0.90	
23	1,2,4-Trimethoxybenzene	29.567	2.76	E
24	2-methyl-4-(1-propenyl)-phenol	29.808	1.85	Ph
25	1,6-Anhydro-beta-d-glucopyranose	31.050	1.78	S
26	2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-phenol	31.708	1.28	Ph
27	1,2,3-trimethoxy-5-methyl-benzene	32.108	1.86	E
28	4-methyl-2,5-dimethylbenzaldehyde	33.425	1.25	Al
29	2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-phenol	34.525	1.08	Ph
30	2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-phenol	36.033	0.84	Ph
31	4-hydroxy-3,5-dimethoxy-Benzaldehyde	36.300	0.95	Al
32	2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-phenol	37.608	2.93	Ph
33	1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-ethanone	38.425	0.89	K
34	1-(2,6-Dihydroxy-4-methoxyphenyl)-1-butanone	39.400	1.04	K

CA= กรดคาร์บอกซิลิก, Al= แอลดีไฮด์, F= ฟลูออรีน, E= อีเทอร์ K= คีโตน, Ph= ฟีนอล,

HC= ไฮโดรคาร์บอน, S= แซ็กคาไรด์

ภาคผนวก ง

แผนผังการออกแบบการทดลอง



บรรณานุกรม

- [1] นฤมล ภาณุนำภา และคณะ. **การใช้ประโยชน์ไม้ไผ่ด้านพลังงาน การผลิตน้ำมันชีวภาพ และการสร้างมูลค่าเพิ่ม**. กรุงเทพฯ : บริษัท พี.เพรส จำกัด, 2560.
- [2] นิลวรรณ ไพรขจรเดช และ เสาวลักษณ์สุรโรจนกุล. **การใช้ประโยชน์ไม้ไผ่ด้านพลังงานโดยการผลิตน้ำมันชีวภาพ**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ม.ป.ป.
- [3] Pattiya, A., S. Sukkasi and V. Goodwin. 2012. **Fast pyrolysis of sugarcane and cassava residues in a free-fall reactor**. Energy 44: 1067-1077
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ม.ป.ป. **โครงการศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวล (Biomass to Liquid: BTL) ด้วยกระบวนการ Fast Pyrolysis**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=44060. (วันที่ค้นข้อมูล: 17 กุมภาพันธ์ 2563)
- [5] สุปราณี แก้วภิรมย์. **ปิโตรเลียมและปิโตรเคมี (Petroleum and Petrochemistry)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: แดเน็กซ์อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น, 2558.
- [6] ปิยนุช นาคพงษ์. สารเคมีจากปิโตรเลียม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ทริปเพิ้ลกรุ๊ป, 2555.
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.). 2560 **ยุทธศาสตร์พลังงานทดแทน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=646&filename=index. (วันที่ค้นข้อมูล: 19 ธันวาคม 2563)
- [8] Charles, Y., & Wereko-Brobby, E.B.H. (1996). **Biomass Conversion and Technology**. John Wiley & Sons. England
- [9] Hoogwijk, M., Faaij, A., Broek, R.V.D., Berndes, G., Gielen, D., & Turkenburg, W. (2003). **Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy**. Biomass & Bioenergy, 25, 119-133
- [10] McKendry, P. (2002). **Energy Production from Biomass (part 1): Overview of Biomass**. Bioresource Technology, 83, 37-46.

- [11] นคร ทิพย์วงศ์. **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2558.
- [12] Shinya Yokoyama. คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล โครงการ สนับสนุนเอเชียพันธมิตร เพื่อการเกษตรใส่ใจสิ่งแวดล้อม. Japan: The Japan Institute of Energy, 2551.
- [13] Ogi, T. in "Biomass Handbook" Japan Institute of Ed., Ohm-sha, 2002, PP. 12-15 in Japanese)
- [14] 13 Mohan D., Pittman Jr C. U., Steele P. H. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels* 20.3 (2006): 848-889.
- [15] Heidari A., Stahl R., Younesi H., Rashidi A., Troeger N., Ghoreyshi A. A. Effect of process conditions on product yield and composition of fast pyrolysis of *Eucalyptus grandis* in fluidized bed reactor. *J. Ind. Eng. Chem.* 20.4 (2014): 2594-2602.
- [16] ไพโรไลซิส (Pyrolysis). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn241_p61-64.pdf (วันที่ค้นข้อมูล: 19 ธันวาคม 2563)
- [17] วิชชากร จารุศิริ. พลังงานจากชีวมวล เทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์ จำกัด, 2561.
- [18] Kanaujia P. K., Naik D. V., Tripathi D., Singh R., Poddar M. K., Konathala L. S. K., Sharma Y. K. Pyrolysis of *Jatropha Curcas* seed cake followed by optimization of liquid-liquid extraction procedure for the obtained bio-oil. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 118 (2016): 202-224.
- [19] Jahirul M. I., Rasul M. G., Chowdhury A. A., AshwathN. Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review. *Energies* 5 (2012): 4952- 5001.
- [20] Verma M., Godbout S., Brar S. K., Solomatnikova O., Lemay S. P., Larouche J. P. Biofuels Production from Biomass by Thermochemical Conversion Technologies. *Int. J. Chem. Eng* 2012 (2012)
- [21] ศิวัช ภูระหงษ์. **การผลิตน้ำมันชีวภาพจากซีลี้อยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ : เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.

- [22] ว่าที่ ร.ต.วรเวช ศรีปราโมช. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสชั้นไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ : เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.
- [23] Varma, A. K., Thakur, L. S., Shankar, R., Mondal, P., (2019). **Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products.** Waste Management. 89, 224-235.