

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียของโรงงาน  
อุตสาหกรรมผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

BIO-FUEL PRODUCTION FROM CATALYTIC PYROLYSIS  
PROCESS OF INDUSTRIAL WASTEWATER SLUDGE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIO-FUEL PRODUCTION FROM CATALYTIC PYROLYSIS  
PROCESS OF INDUSTRIAL WASTEWATER SLUDGE



SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียของโรงงาน  
อุตสาหกรรมผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา  
Bio-fuel Production from Catalytic Pyrolysis Process of  
Industrial Wastewater Sludge

ชื่อนักศึกษา

นายธนบดี ช่อนกลิ่น 59050410

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

คณะ

วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)




ปีการศึกษา

2562

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ประธานกรรมการ	
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการ	
ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียของโรงงาน อุตสาหกรรมผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา
ชื่อนักศึกษา	นายธนบดี ช่อนกลิ่น 59050410
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมของบริษัทไทยมิทซูสเปเซียลตี้เคมีคอล จำกัด ซึ่งจัดเป็นสารชีวมวลชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งการเปลี่ยนกากตะกอนน้ำเสียเป็นเชื้อเพลิงที่มีมูลค่าสูงขึ้นสามารถทำได้โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) โดยศึกษาปัจจัยที่สำคัญ 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เวลา และปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) พบว่า ที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที และไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ให้อัตราผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) มากที่สุดถึง 52.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 120 นาที และปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้อัตราผลผลิตที่เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) มากที่สุด และที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที และไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา จะให้อัตราผลผลิตที่เป็นถ่านชีวภาพ (Char) มากที่สุด และเมื่อวิเคราะห์การเลือกเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) พบว่า ร้อยละการเลือกเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยคาร์บอน 12-20 อะตอมเป็นส่วนมาก ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในช่วงของน้ำมันดีเซล (Diesel) และร้อยละการเลือกเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) เป็นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ จะเพิ่มผลผลิตที่เป็นแก๊สชีวภาพ แต่จะลด

ปริมาณผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ เมื่อพิจารณาการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดีโกลโมต์จะเพิ่มกลุ่มไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยคาร์บอน 8-10 อะตอม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในช่วงของน้ำมันเบนซิน ทั้งนี้ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้ก่อนนำไปใช้งาน

**คำสำคัญ :** กากตะกอนน้ำเสีย กระบวนการไพโรไลซิส แก๊สชีวภาพ น้ำมันชีวภาพ ถ่านชีวภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Bio-fuel production from catalytic pyrolysis process of industrial wastewater sludge
<b>Students</b>	Mr. Thanabordee Sonklin Student ID 59050410
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2019
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Montree Thongkam

### Abstract

This special project is bio-fuel production with pyrolysis process of industrial wastewater sludge from Thai Mitsui Specialty Chemical Company Limited. Wastewater sludge is a type of biomass that can be used as an alternative fuel to replace fossil fuels. The conversion of wastewater sludge into fuel with higher value can be done through the pyrolysis process in a fixed bed reactor for 4 factors are temperature, nitrogen gas flow rate, running time and amount of dolomite catalyst. It found at temperature of 450 °C, nitrogen gas flow rate of 80 ml/min, running time of 60 minutes by without dolomite catalyst providing the highest percentage of bio-oil production is 52.02 % by weight. The temperature of 550 °C, nitrogen gas flow rate of 120 ml/min, running time of 120 minutes and the amount of dolomite catalyst is 20 % by weight provided the highest percentage of bio-gas production as the temperature of 350 °C, nitrogen gas flow rate of 120 ml/min, running time of 60 minutes by without dolomite catalyst provided the highest percentage of bio-char. The selectivity of the hydrocarbon compound was the gas chromatography was revealed that the percentage selectivity of bio oil (Bio-oil) was composed of 12-20 carbon atoms, which is the main component in the diesel range and the percentage selectivity of bio-gas was methane gas (CH<sub>4</sub>). The amount of dolomite catalysts increased the production of bio-gas but it reduced the production of bio-oil. The selectivity of bio-oil was revealed the dolomite catalyst increases the hydrocarbon groups consisting of 8-10 carbon

atoms, which are the main components in the benzene range. This must be done to improve the quality of bio-oil obtained before use.

**Keywords :** Wastewater sludge, Pyrolysis process, Bio-gas, Bio-oil, Char



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา จาก ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ อาจารย์ที่  
 ปรึกษาสหกิจศึกษา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง  
 ต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยจึงกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณวศิน ศรีบุญมี ผู้จัดการฝ่ายยุทธิตีและพลังงาน ของบริษัทไทยมิทซูย  
 สเปเชียลตีเคมีคอล จำกัด ที่คอยเป็นผู้ประสานงานระหว่างบริษัทกับผู้ทำวิจัยของสหกิจศึกษา ทำให้  
 งานดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ประธานกรรมการสอบ และ ดร.อำนาจ เพิ่ม  
 ทรัพย์สกุล กรรมการสอบ ที่ได้เข้าร่วมเป็นกรรมการสอบโครงร่างและสอบหัวข้อสหกิจศึกษา นี้ อีกทั้ง  
 ยังให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมอื่น ๆ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
 พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำในการยืม-คืน และซ่อมแซม  
 อุปกรณ์ในการทำสหกิจศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความหวังใยและคอยสนับสนุนตลอดมา รวมถึงเพื่อน ๆ  
 และพี่ ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในทุก ๆ ปัญหาจนสามารถทำให้สหกิจศึกษาสำเร็จใน  
 ที่สุด

สหกิจศึกษานี้มีประโยชน์และให้ความรู้แก่ผู้เดินทางไปศึกษาต่อ ผู้จัดทำขอขอบความดีนี้ให้กับ  
 อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของสหกิจศึกษา และหากมีความผิดพลาดประการใด  
 ในสหกิจศึกษา นี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ โอกาสนี้

ธนบดี ช่อนกลิ่น

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ชีวมวล (Biomass).....	4
2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล.....	5
2.1.2 การแปรรูปสารชีวมวล.....	5
2.1.3 ผลกระทบจากการใช้พลังงานชีวมวล.....	6
2.2 น้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	7
2.2.1 กลไกการบำบัดน้ำเสีย.....	8
2.2.2 การบำบัดกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม.....	9
2.2.3 การกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย.....	9
2.2.4 ระบบการบำบัดน้ำเสียโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี เคมีคอล จำกัด.....	10
2.3 เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel).....	11
2.4 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process).....	12
2.4.1 กลไกการเกิดไพโรไลซิส.....	14
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส.....	15
2.4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส.....	18
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst).....	22
2.6 โดโลไมต์ (Dolomite).....	24
2.6.1 สมบัติทั่วไปของโดโลไมต์.....	25
2.6.2 ประโยชน์ของโดโลไมต์.....	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>31</b>
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.1.1 สารตัวอย่างและสารเคมี.....	31
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	31
3.2 วิธีการทดลอง.....	35
3.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	35
3.2.2 การเตรียมกากตะกอนน้ำเสียและตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	36
3.2.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของกากตะกอนน้ำเสียและตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	38
3.2.4 การไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย.....	38
3.2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง.....	41
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>43</b>
4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	43
4.1.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางกายภาพโดยวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis).....	43
4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis/Differential thermal analysis, TGA/DTG).....	44
4.1.3 วิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของกากตะกอนน้ำเสียด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS).....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite).....	47
4.3 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสีย	
อุตสาหกรรม.....	49
4.3.1 ผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์.....	49
4.3.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์	50
4.3.3 ผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ .....	51
4.3.4 ผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ ..	52
4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสีย	
อุตสาหกรรม.....	54
4.4.1 การเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas).....	54
4.4.2 การเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil).....	57
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>60</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	60
5.1.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสียและ	
ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite).....	60
5.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสีย.....	60
5.1.3 การศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น .....	61
5.1.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน	
น้ำเสียอุตสาหกรรม.....	61
5.1.5 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อกระบวนการไพโรไลซิสของ	
กากตะกอนน้ำเสีย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	62
เอกสารอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก .....	67
ภาคผนวก ก .....	68
ภาคผนวก ข .....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับ จากโรงงานอุตสาหกรรม.....	43
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของกากตะกอนน้ำเสียก่อนกระบวนการ ไพโรไลซิสด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์.....	46
4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ก่อนกระบวนการไพโรไลซิสด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์.....	48
ก.1 แสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการ ไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย.....	68
ก.2 แสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย.....	69
ก.3 แสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการ ไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย.....	69
ก.4 แสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาใน การไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย.....	70
ก.5 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการ ไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย.....	72
ก.6 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย.....	73
ก.7 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิส กากตะกอนน้ำเสีย.....	74
ก.8 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาใน การไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย.....	75
ข.1 แสดงพื้นที่ได้กราฟของการเลือกเกิดเป็นแก๊สชีวภาพสำหรับการทดลองครั้งที่ 1.....	76
ข.2 แสดงพื้นที่ได้กราฟของการเลือกเกิดเป็นแก๊สชีวภาพสำหรับการทดลองครั้งที่ 2.....	77
ข.3 แสดงพื้นที่ได้กราฟของการเลือกเกิดเป็นแก๊สชีวภาพสำหรับการทดลองครั้งที่ 3.....	78
ข.4 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของแก๊ส ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.5 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของแก๊สชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิส .....	81
ข.6 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของแก๊สชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิส .....	82
ข.7 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของแก๊สชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส.....	83
ข.8 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส.....	84
ข.9 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิส.....	85
ข.10 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิส.....	86
ข.11 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส.....	87
ข.12 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส .....	89
ข.13 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิส.....	90
ข.14 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิส.....	91
ข.15 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส .....	92

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนผังการบำบัดน้ำเสียของโรงงานบริษัทไทยมิตซูซุสเปเซียลตีเคมิคอล จำกัด .....	11
2.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสและการนำไปใช้ประโยชน์ .....	18
2.3 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองอากาศ .....	19
2.4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายไอออน .....	20
2.5 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ .....	20
2.6 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทิป .....	21
2.7 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรู .....	21
2.8 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ .....	22
2.9 การกระจายอนุภาคของแมกซ์เวล-โบลซ์มัน .....	23
2.10 การเปรียบเทียบพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา .....	24
2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ .....	25
3.1 เตาเผาสำหรับเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (Furnace), L9/12P .....	32
3.2 ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Yamato .....	32
3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของแก๊ส .....	33
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของของเหลว .....	34
3.5 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) .....	35
3.6 กากตะกอนน้ำเสียบริษัทไทยมิตซูซุสเปเซียลตีเคมิคอล จำกัด .....	36
3.7 ตะแกรงร่อนคัดขนาดในช่วง 500-850 ไมโครเมตร .....	37
3.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ .....	37
3.10 ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่กับเตาปฏิกรณ์ .....	39
3.11 เครื่องควบแน่นด้วยความเย็น (Ice trap) .....	39
3.12 การตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ .....	40
3.13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส .....	40
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของกากตะกอนน้ำเสียด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.	44
4.2 โครงสร้างพื้นฐานของกากตะกอนน้ำเสียที่กำลังขยาย 10,000 เท่า .....	45
4.3 โครงสร้างพื้นฐานของกากตะกอนน้ำเสียที่กำลังขยาย 500 เท่า .....	46
4.4 โครงสร้างพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) กำลังขยาย 10,000 เท่า ....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 โครงสร้างสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	48
4.6 แสดงผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ.....	49
4.7 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ.	51
4.8 แสดงผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ.....	52
4.9 แสดงผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ.....	53
4.10 แสดงผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas) .....	54
4.11 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas).....	55
4.12 แสดงผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas).....	55
4.13 แสดงผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas).....	56
4.14 แสดงผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil).....	57
4.15 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil).....	58
4.16 แสดงผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil).....	58
4.17 แสดงผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil).....	59

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงาน เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ ในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของมนุษย์ และเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิต ในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ในปัจจุบันการใช้พลังงานของโลก ประกอบด้วย เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน พลังงานดังกล่าวจัดเป็นพลังงานสิ้นเปลือง เนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป การใช้พลังงานฟอสซิลจำนวนมากซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด อาจส่งผลต่อการเกิดวิกฤติการณ์ด้านพลังงาน ซึ่งได้ก่อตัวและทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ทั้งจากการขาดแคลนแหล่งพลังงานและผลกระทบของการใช้พลังงานที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมของโลก หนทางหนึ่งในการแก้ไขวิกฤติการณ์ดังกล่าว คือ การใช้พลังงานทดแทน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ และไฮโดรเจน เป็นต้น [1]

พลังงานชีวมวล เป็นพลังงานทางเลือกอย่างหนึ่ง ที่สามารถทดแทนพลังงานจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่จำกัดและอาจหมดลงได้ การใช้งานชีวมวลเพื่อทำให้ได้พลังงาน สามารถนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ ไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า หรือการนำความร้อนไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยแหล่งที่มาของชีวมวล ได้แก่ พืชผลการเกษตร (Agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (Agricultural residues) ไม้และเศษไม้ (Wood and wood residues) รวมถึงกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial wastewater sludge) เป็นต้น [2]

ในปัจจุบัน แนวโน้มปริมาณของขยะของเสียในประเทศต่าง ๆ นับวันจะทวีมากขึ้น อันเนื่องมาจากความเจริญทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และเทคโนโลยีการผลิต โดยของเสียส่วนใหญ่ นั้นมาจากระบบบำบัดน้ำเสียในรูปของกากตะกอน กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย จะถูกนำไปกำจัดทิ้งด้วยหลายวิธี อาทิ การฝังกลบ การเผาด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อนำความร้อนไปใช้ หรือนำมาปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้ทำเป็นปุ๋ยทางการเกษตร เป็นต้น นอกจากนี้สามารถนำกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่กากตะกอนในความดันบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เกิดการสลายตัวทางเคมีเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (Bio-fuel) ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) แก๊สชีวภาพ (Biogas) และถ่านชาร์ (Char) ซึ่งเป็นหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม รวมถึงการลดต้นทุนการผลิตด้านเชื้อเพลิง [3] แต่เนื่องจากกากตะกอนน้ำเสียของโรงงาน

อุตสาหกรรมแต่ละแห่งนั้น มีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนน้ำเสียมาใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพก่อน โดยสหกิจศึกษานี้ เป็นการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากบริษัท ไทยมิทซุสเปเซียลตีเคมิคอล จำกัด โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) เพื่อทำการศึกษาอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สตัวพา เวลาในการไพโรไลซิส และปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ที่ส่งผลต่อความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) แก๊สชีวภาพ (Bio-gas) และถ่านชีวภาพ (Char) พร้อมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เวลาในการไพโรไลซิส และตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ ที่ส่งผลต่อการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) แก๊สชีวภาพ (Bio-gas) และถ่านชาร์ (Char) โดยกระบวนการไพโรไลซิส ด้วยเตาปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor)
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิทซุสเปเซียลตีเคมิคอล จำกัด

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวแปรต้นของการทดลอง คือ อุณหภูมิในการไพโรไลซิส ได้แก่ 350 450 และ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ได้แก่ 40 80 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิส ได้แก่ 60 90 และ 120 นาที และปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ได้แก่ 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสีย
2. ตัวแปรตามของการทดลอง คือ ปริมาณผลได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) แก๊สชีวภาพ (Bio-gas) และถ่านชีวภาพ (Char) สมบัติและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้
3. ตัวแปรควบคุมของการทดลอง คือ ขนาดของกากตะกอนน้ำเสีย เท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร จำนวน 1 กรัม อัตราการให้ความร้อน เท่ากับ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร ชนิดของเตาปฏิกรณ์ คือ เตาปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) เครื่องควบแน่นด้วยความเย็น (Ice trap) ทรายควอตซ์ จำนวน 0.5 กรัม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัทไทยมิตรชูสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด ต่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแต่ละชนิด คือ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) แก๊สชีวภาพ (Bio-gas) และถ่านชีวภาพ (Char)
2. ลดต้นทุนในการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียของบริษัท ไทยมิตรชูสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด โดยการส่งกากตะกอนน้ำเสียไปยังโรงงานไพโรไลซิสโดยตรง เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนน้ำเสีย
3. สามารถผลิตพลังงานทางเลือก แทนการใช้น้ำมันจากเชื้อเพลิงฟอสซิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม จัดเป็นชีวมวล (Biomass) ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์สาร (Organics compounds) ดังนั้นจึงสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงโครงสร้างภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงและปราศจากออกซิเจนได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ อาทิเช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคุณค่าความร้อนปานกลาง หรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียนั้น มีลักษณะในเชิงคุณภาพต่างกัน ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียแต่ละแห่งนั้นต่างกันด้วย [4]

### 2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าว เปลือกขานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออกกาก และกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว สำเหล้ม้า ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแล้วเปลี่ยนพลังงาน จากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง จะได้พลังงานออกมา การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งทีกล่าวมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทน ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล [5]

องค์ประกอบของชีวมวลแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการกำจัดความชื้นออกจากชีวมวลเสียก่อน
2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่สามารถระเหยได้ (Volatiles matter) และส่วนคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) ชีวมวลที่มีค่า Volatiles matter สูงจะติดไฟได้ง่ายและชีวมวลที่มีค่า Fixed Carbon สูงจะมีค่าความร้อนสูง
3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ ขี้เถ้า (Ash) ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้ และกำจัดพอสมควร

### 2.1.2 การแปรรูปสารชีวมวล [6]

การแปรรูปชีวมวลเพื่อให้เป็นรูปแบบต่างๆ สามารถทำได้ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1. แปรรูปด้วยวิธีการเผาไหม้ (Combustion) เนื่องจากการเผาสารชีวมวลจะได้เป็นความร้อนออกมาตามค่าของวัตถุดิบชีวมวลแต่ละชนิด จึงสามารถนำความร้อนที่ได้จากการเผา ไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงสำหรับการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง แล้วจึงนำไอน้ำแรงดันสูงไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป ชีวมวลที่สามารถนำมาแปรรูปในลักษณะนี้ได้ เช่น เศษวัตถุดิบจากงานเกษตรทั้งหลาย เศษไม้ หรือกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม
2. แปรรูปด้วยการผลิตก๊าซ (Gasification) เป็นลักษณะของการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงหรือก๊าซชีวภาพ (Biogas) จะประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (Methane) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) และก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) โดยส่วนมากจะนำไปใช้กับกังหันลมแก๊ส
3. แปรรูปด้วยวิธีการหมัก (Fermentation) คือการนำวัตถุดิบจากชีวมวลมาผ่านกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียที่อยู่ในสภาพไร้อากาศ สารชีวมวลดังกล่าวจะค่อย ๆ ถูกย่อยสลายจนเกิดการแตกตัว กลายเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซมีเทนถือเป็นเชื้อเพลิงในตัวเครื่องยนต์สำหรับการผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง
4. แปรรูปด้วยวิธีการผลิตเชื้อเพลิงเหลว สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการต่างๆ ต่อไปนี้
  - 4.1 กระบวนการดำนชีวภาพเป็นการย่อยสลายจำพวกแป้ง หรือน้ำตาล รวมถึงเซลลูโลสต่างๆ จากพืชทางการเกษตรทั้งหลาย อาทิ มันสำปะหลัง อ้อย เพื่อให้กลายเป็นเอทานอล (Ethanol) สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เบนซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กระบวนการดำนฟีลิกส์และเคมี เป็นการสกัดเอาน้ำมันออกมาจากพืชที่มีน้ำมันในตัว แล้วจึงผ่านกระบวนการที่เรียกว่า ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) เพื่อใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล (Bio-diesel) ต่อไป

4.3 กระบวนการด้านการใช้ความร้อนสูง ประกอบด้วยหลายกระบวนการ อาทิ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) เมื่อวัตถุดิบจากงานเกษตรดังกล่าวโดนความร้อนสูงในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน จะทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวไปกลายเป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของของเหลวและก๊าซผสมกัน

### 2.1.3 ผลกระทบจากการใช้พลังงานชีวมวล

การเผาไหม้สารทุกชนิดจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งลอยไปในอากาศและห่อหุ้มโลกไว้ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องลงมาถึงโลก รังสีบางส่วนไม่สามารถสะท้อนกลับออกไปได้ ทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น เรียกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas) แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้โดยพืชเพื่อสังเคราะห์แสง ดังนั้นการเผาไหม้ชีวมวลไม่ถือว่าเป็นการเกิดก๊าซเรือนกระจก (Carbon Offset) การไม่นำชีวมวลมาใช้โดยปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ เช่น มูลสัตว์ จะเกิดก๊าซมีเทน ซึ่งถือว่าเป็นก๊าซเรือนกระจกชนิดหนึ่งและมีอันตรายกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า ชีวมวลจะมีปริมาณกำมะถันหรือซัลเฟอร์ไม่เกิน 0.2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการนำชีวมวลมาทำการเผาไหม้ จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของน้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และกำมะถันมีปริมาณกำมะถันประมาณ 0.3-3.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของกำมะถัน ซัลเฟอร์ของสารชีวมวลมีสภาพเป็นต่าง เหมาะสมที่จะนำไปเพาะปลูกหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด และช่วยลดภาระในการกำจัดเช่น นำไปฝังกลบและเผาทิ้ง เป็นต้น

ในการเผาไหม้จะได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งมีสารโลหะหนักปนอยู่ ดังนั้นต้องนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธี เช่น มีฝ้ายกรองรับด้านล่าง เพื่อป้องกันการสารโลหะหนักปนลงไปในชั้นของดิน การใช้พลังงานจากชีวมวลก่อให้เกิดการสร้างงานในท้องถิ่น ชุมชนมีรายได้เพิ่มขึ้น มีการประเมินว่า การนำชีวมวลในท้องถิ่นมาใช้ ทำเงินหมุนเวียนในระบบเพิ่มขึ้นถึง 7 เท่าและรายได้ประชาชาติสูงขึ้น กล่าวคือเมื่อชาวไร่ชาวนามีรายได้เพิ่มขึ้นจากชีวมวล จะนำเงินส่วนนี้ไปใช้จ่ายหมุนเวียนในท้องถิ่นเช่น ค่าจ้างคนเก็บสารชีวมวลหรือการรวบรวมสารชีวมวล คนเหล่านี้ จะนำเงินไปใช้จ่ายต่ออีกทอดหนึ่ง เป็นอย่างนี้เรื่อยไปนอกจากนี้เป็นการประหยัดเงินตราต่างประเทศ เพราะไม่ต้องนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเตา และกำมะถัน เป็นต้น [5]

พลังงานจากชีวมวล มีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทกำมะถัน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันเตาหลายประการและเหตุผลที่ทำให้การผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานหมุนเวียนไม่แพร่หลายเท่าที่ควรเนื่องจาก สารชีวมวลมีปริมาณที่ค่อนข้างไม่แน่นอน ชีวมวลแต่ละชนิดปลูกเพียงตามฤดูกาล และผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนชนิดของผลผลิตไปตามความต้องการของตลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่การเกษตรลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพไปสู่เมือง ถึงแม้ว่าโดยรวมแล้วสารชีวมวลมีอยู่มากแต่อยู่อย่างกระจุกกระจายทำให้รวบรวมได้ยาก เช่น กะลามะพร้าว เศษไม้ ซังข้าวโพด ยอดอ้อยที่อยู่ตามท้องไร่ท้องนา และแกลบตามโรงสีเล็ก ๆ การผลิตพลังงานทดแทนจากสารชีวมวลควรคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่จะลงทุนเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าระหว่างโรงงานสู่ระบบสายส่งของการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค เช่น ค่าอุปกรณ์เชื่อมต่อ ค่าก่อสร้างระบบสายส่ง เป็นต้น นอกจากนี้ราคารับซื้อและราคาขายของไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานสิ้นเปลืองยังค่ามากเมื่อเทียบกับไฟฟ้าที่ได้จากสารชีวมวล จึงทำให้ไม่เกิดแรงจูงใจในการผลิต แต่ถ้าราคาไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานสิ้นเปลืองสูงขึ้นในอนาคตก็จะเป็นแรงจูงใจให้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล จนทำให้มีไฟฟ้าเหลือมากพอจำหน่ายคืนเข้าระบบของการไฟฟ้า ๆ ได้ [7]

## 2.2 น้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำเสีย หมายถึงน้ำที่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ มากมาย จนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการและน่ารังเกียจของคนทั่วไป ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์อีกต่อไป หรือถ้าปล่อยลงสู่ลำน้ำธรรมชาติก็จะทำให้คุณภาพน้ำของธรรมชาติเสียหายได้ ซึ่งน้ำเสียมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เช่น เศษข้าว ก๋วยเตี๋ยว น้ำแกง ใบตอง พืชผัก ขึ้นเนื้อ เป็นต้น ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้ โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ระดับออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen) ลดลงเกิดสภาพเน่าเหม็นได้ ปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำนิยมนวัดด้วยค่าบีโอดี (BOD) เมื่อค่าบีโอดีในน้ำสูง แสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก และสภาพเน่าเหม็นจะเกิดขึ้นได้ง่าย

2. สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่าง ๆ ที่อาจไม่ทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ คลอไรด์, ซัลเฟต เป็นต้น

3. โลหะหนักและสารพิษ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหาร เกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่นปรอท โครเมียม ทองแดง ปกติจะอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร สำหรับในเขตชุมชนอาจมีสารมลพิษนี้มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ ตู้ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น

4. น้ำมันและสารลอยน้ำต่าง ๆ เป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสง และกีดขวางการกระจายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ นอกจากนั้นยังทำให้เกิดสภาพไม่น่าดู

5. ของแข็ง เมื่อจมตัวสู่ก้นลำน้ำ ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน มีความขุ่นสูง มีผลกระทบต่อการค้ารังสีของสัตว์น้ำ

6. สารก่อให้เกิดฟอง/สารซักฟอก ได้แก่ ผงซักฟอก สบู่ ฟองจะกีดกันการกระจายของ

เอกสารนี้ออกซิเจนในอากาศสู่น้ำ และอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จุลินทรีย์ น้ำเสียจากโรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ หรือโรงงานอาหารกระป๋อง จะมีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมากจุลินทรีย์เหล่านี้ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตสามารถลดระดับของออกซิเจนละลายน้ำทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็น นอกจากนี้จุลินทรีย์บางชนิดอาจเป็นเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อประชาชน เช่น จุลินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงพยาบาล

8. ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของสาหร่าย (Algae Bloom) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำมากในช่วงกลางคืน อีกทั้งยังทำให้เกิดวัชพืชน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาแก่การสัญจรทางน้ำ

9. กลิ่น เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน หรือกลิ่นอื่น ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น [8]

### 2.2.1 กลไกการบำบัดน้ำเสีย [8]

โรงบำบัดน้ำเสียเป็นสถานที่รวบรวมน้ำเสียจากบ้านเรือน แหล่งพาณิชยกรรม อุตสาหกรรม และสถาบัน เข้าสู่กระบวนการบำบัดแบบต่าง ๆ เพื่อกำจัดมลสารที่อยู่ในน้ำเสีย ให้มีคุณภาพดีขึ้นและไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อแม่น้ำ ลำคลอง แหล่งน้ำธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อมโดยรอบ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือบางส่วนยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตร อุตสาหกรรม และอื่นๆ การบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้ตามกลไกที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ได้ดังนี้

1. การบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) เป็นวิธีการแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย เช่น ของแข็งขนาดใหญ่ กระจาด พลาสติก เศษอาหาร กรวด ทราย ไขมันและน้ำมัน โดยใช้อุปกรณ์ในการบำบัดทางกายภาพ คือ ตะแกรงดักขยะ ถังดักกรวดทราย ถังดักไขมันและน้ำมัน และถังตกตะกอน ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในน้ำเสียเป็นหลัก

2. การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย วิธีการนี้จะใช้สำหรับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้ คือ ค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ มีโลหะหนัก มีของแข็งแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก มีไขมันและน้ำมันที่ละลายน้ำ มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่สูงเกินไป และมีเชื้อโรค ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า ถังตกตะกอน ถังกรอง และถังฆ่าเชื้อโรค

3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้จุลินทรีย์ ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียโดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง โดยจุลินทรีย์เหล่านี้ อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Organisms) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Organisms) ก็ได้

ระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักการทางชีวภาพ ได้แก่ ระบบ แอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activate Sludge, ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AS) ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC) ระบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch, OD) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon, AL) ระบบโปรยกรอง (Trickling-Filter) ระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย (Stabilization Pond) ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge-Blanket, UASB) และ ระบบกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter, AF) เป็นต้น

### 2.2.2 การบำบัดกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้หลักการทางชีวภาพจะมีกากตะกอนน้ำเสียหรือสลัดจ์ (Sludge) เป็นผลผลิตตามมามากด้วยเสมอ ซึ่งเป็นผลจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในการกินสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดสลัดจ์เหล่านั้น เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการเน่าเหม็นของสลัดจ์ การเพิ่มภาวะมลพิษ และเป็นการทำลายเชื้อโรคด้วย นอกจากนี้การลดปริมาณของสลัดจ์โดยการกำจัดน้ำออกจากสลัดจ์ ช่วยให้เกิดความสะดวกในการเก็บขนไปกำจัดทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ทั้งนี้ในการบำบัดสลัดจ์ประกอบด้วยกระบวนการหลัก ๆ ได้แก่

1. การทำชั้น (Thickener) โดยใช้ถังทำชั้นซึ่งใช้กลไกการตกตะกอน (Sedimentation) และใช้กลไกการลอยตัว (Floatation) ทำหน้าที่ในการลดปริมาณสลัดจ์ก่อนส่งไปบำบัดโดยวิธีการอื่นต่อไป
2. การทำให้สลัดจ์คงตัว (Stabilization) โดยการย่อยสลัดจ์ด้วยกระบวนการใช้อากาศ หรือใช้กระบวนการไร้อากาศ เพื่อทำหน้าที่ในการลดสารอินทรีย์ในสลัดจ์ ทำให้สลัดจ์คงตัวสามารถนำไปทิ้งได้โดยไม่เน่าเหม็น
3. การปรับสภาพสลัดจ์ (Conditioning) เพื่อให้สลัดจ์มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น ทำปุ๋ย การใช้ปรับสภาพดินสำหรับใช้ทางการเกษตร เป็นต้น
4. การรีดน้ำ (Dewatering) เพื่อลดปริมาณสลัดจ์ที่จะนำไปทิ้งโดยการฝังกลบ การเผา หรือนำไปใช้ประโยชน์อื่น ซึ่งทำให้เกิดความสะดวกในการขนส่ง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการรีดน้ำ ได้แก่ เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filter) เครื่องอัดกรอง (Filter press) หรือเครื่องกรองหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) รวมถึงการลานตากสลัดจ์ (Sludge drying bed)

### 2.2.3 การกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย

หลังจากสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียได้รับการบำบัดให้มีความคงตัว ไม่มีกลิ่นเหม็น และมีปริมาตรลดลง เพื่อความสะดวกในการขนส่งแล้ว ในขั้นตอนต่อมาก็คือ การนำสลัดจ์ไปกำจัดทิ้งโดยวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการกำจัดทิ้งที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

1. การฝังกลบ (Landfill) เป็นการนำสลัดจ์มาฝังในสถานที่ที่จัดเตรียมไว้และกลบด้วยชั้นดินทับอีก ชั้นหนึ่ง

2. การหมักทำปุ๋ย (Composting) เป็นการนำสัจมาหมักต่อเพื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ย ซึ่งเป็นการนำสัจกลับมาใช้ประโยชน์ในการเป็นปุ๋ยสำหรับปลูกพืช เนื่องจากในสัจประกอบด้วยธาตุอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแร่ธาตุต่างๆ

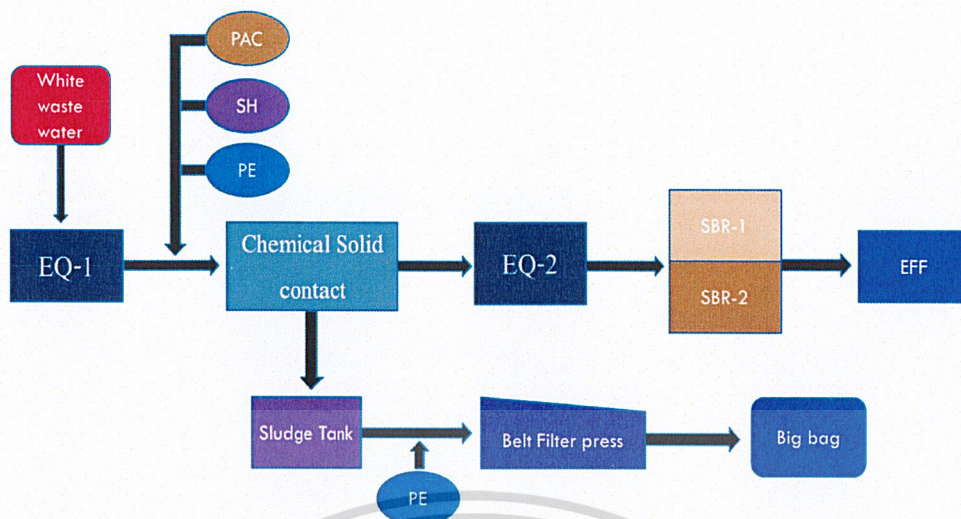
3. การเผา (Incineration) เป็นการนำสัจที่จวนแห้ง (ตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งขึ้นไป) มาเผา เพราะเนื่องจากไม่สามารถนำไปใช้ทำปุ๋ยหรือฝังกลบได้

#### 2.2.4 ระบบการบำบัดน้ำเสียโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด

บริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด เป็นบริษัทที่ประกอบธุรกิจเกี่ยวกับเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรมโพลียูรีเทน (Polyurethane) และเรซินสังเคราะห์ (Synthetic resins) ดังนั้นในกระบวนการผลิตจะเกิดของเสียที่จำเป็นต้องกำจัด ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถอธิบายคร่าว ๆ ได้ 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. การบำบัดน้ำด้วยวิธีทางเคมี โดยการสูบน้ำจากบ่อเก็บน้ำเสียเข้าสู่เครื่องตกตะกอนเคมี (Chemical Solid Contact) จากนั้นทำการเติมสารเคมีจำเป็นในการช่วยเร่งตกตะกอน คือ สารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum Chloride : PAC) เป็นสารช่วยตกตะกอนน้ำเสีย ให้ตกตะกอนง่ายขึ้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารช่วยปรับค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสีย และพอลิเมอร์ (Polymer) เป็นสารที่ทำให้ตะกอนจับกันเป็นก้อนมากขึ้น เมื่อทำการเติมสารเคมีดังกล่าวแล้วจะแยกน้ำออกจากตะกอน โดยนำตะกอนที่ได้จากเครื่องตกตะกอนเคมี ผ่านเครื่องรีดตะกอนเพื่อไล่น้ำ จะได้ส่วนที่เป็นกากตะกอนน้ำเสีย กากตะกอนที่ได้จะถูกกำจัดทิ้งโดยวิธีที่เหมาะสม ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดทางเคมีแล้วจะทำการบำบัดอีกครั้งด้วยวิธีทางชีวภาพ ก่อนส่งไปยังบ่อบำบัดของนิคมอุตสาหกรรมต่อไป

2. การบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นการบำบัดน้ำโดยใช้จุลินทรีย์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และกลิ่นเป็นหลัก โดยจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงมีระบบเติมอากาศลงบ่อบำบัดน้ำเพื่อเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ให้สามารถย่อยสลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้



รูปที่ 2.1 แผนผังการบำบัดน้ำเสียของโรงงานบริษัทไทยมิทชุยเซปเซียลตีเคมิคอล จำกัด

### 2.3 เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) [9]

เชื้อเพลิงชีวภาพ หรือ Biofuel คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล (Biomass) หรือ สสารที่ได้จากพืชและสัตว์โดยมีพื้นฐานจากการสังเคราะห์แสง แล้วเก็บรวบรวมพลังงานจากดวงอาทิตย์เอาไว้ในรูปของพลังงานเคมี พืชเป็นพลังงานชีวภาพรูปแบบหนึ่งเพราะเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นเองโดยกลไกของธรรมชาติที่เรียกว่า “กระบวนการสังเคราะห์แสง” (Photosynthetic Process) ซึ่งพืชจะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานสะสมในรูปของสารอินทรีย์ ที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช เมื่อคนหรือสัตว์กินพืชเป็นอาหาร ก็จะได้สารอินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายเราเรียกสารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตทั้งหลายว่า ชีวมวล (Biomass) และเมื่อเรานำสารอินทรีย์เหล่านั้นมาผ่านกระบวนการที่เหมาะสมจะสามารถเปลี่ยนชีวมวลเหล่านั้นให้เป็นพลังงานที่เป็นประโยชน์ได้ เชื้อเพลิงชีวภาพแตกต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหินและปิโตรเลียม ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงชีวภาพจัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถฟื้นฟูหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ สามารถปลูกทดแทนให้เจริญเติบโตขึ้นมาได้ทัน นอกจากนี้เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ต่างๆ เนื่องจากประกอบไปด้วยสถานะ 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่สำคัญคือ การเผาเชื้อเพลิงชีวภาพไม่ก่อให้เกิดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นและยังก่อให้เกิดปริมาณก๊าซพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นเมื่อเทียบกับในอัตราต่อหน่วย การใช้เชื้อเพลิงชีวภาพจึงเท่ากับเป็นการช่วยรักษาสภาพแวดล้อมได้อย่างมาก ปัจจุบันโลกใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวภาพในปริมาณไม่มาก คือ ประมาณร้อยละ 15 เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการค้นคว้าพยายามใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่นในยุโรปมีการนำเชื้อเพลิงชีวภาพไปใช้เพื่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าขนาดเล็กและใช้ในภาคเกษตรกรรม เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวภาพหลักมี 3 รูปแบบ ได้แก่

1. ของแข็ง ได้แก่ ไม้ ชี้อเลื้อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย มูลสัตว์ ถ่าน เตา เปลือกสัตว์ หรือเปลือกพืช อาทิ แกลบข้าว ฝ้าย ถั่วลิสง เป็นต้น ไม้พืชมักเป็นพลังงานชีวภาพชนิดแรกที่มนุษย์นำมาใช้ในการหุงต้มอาหารให้แสงสว่างและสร้างความอบอุ่นให้แก่ครัวเรือนตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ หลายพันปีมาแล้ว เนื้อไม้ประกอบด้วยสารประกอบต่าง ๆ มากมายโดยมีเซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบหลักประมาณร้อยละ 50 สารประกอบแต่ละชนิดจะให้ความร้อนแตกต่างกันไป ไม้ที่มีความชื้นต่ำจะให้ค่าความร้อนมากกว่าไม้ที่มีความชื้นสูง ดังจะเห็นได้ว่าการนำไม้สดไปใช้เป็นฟืนโดยตรงจะให้ความร้อนน้อย คือมีค่าความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันทรัพยากรไม้มีปริมาณลดน้อยลงมาก การตัดไม้ทั่วโลกเพื่อใช้ทำฟืนจึงมีปริมาณลดลง

2. ของเหลว พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพที่อยู่ในรูปของเหลวจะแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

2.1 แอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ มีสถานะเป็นของเหลวระเหยง่าย แอลกอฮอล์ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมี 2 ชนิดคือ เอทานอล และเมทานอล

2.2 น้ำมันจากพืชและสัตว์ ได้แก่ น้ำมันพืชบริสุทธิ์ น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (Waste Vegetable Oil) ไขมันสัตว์ และไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยผ่านกรรมวิธีทางเคมี

2.3 น้ำมันจากขยะ น้ำมันซึ่งมีคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพคล้ายคลึงกับปิโตรเลียม สามารถสกัดจากขยะชีวมวลมาใช้งานได้

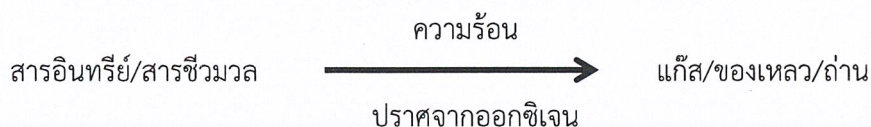
3. ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ส่วนใหญ่ คือ ก๊าซมีเทนที่ได้จากการหมักมูลสัตว์หรือของเสียจากโรงเลี้ยงสัตว์ เช่น สุกร โค กระบือ โดยรวบรวมของเสียเหล่านี้ใส่ในถังหมักที่มีเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในที่ไม่มีอากาศ จุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ในของเสียและเกิดก๊าซมีเทนขึ้น ก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการปรุงอาหารและกระบวนการอื่น ๆ ที่ต้องการใช้ความร้อน ส่วนของเหลือจากถังหมักเมื่อสะสมมาก ๆ ยังนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้อีกด้วย

## 2.4 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process)

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อนในสภาวะไร้อากาศ โดยเกิดการแตกของพันธะโมเลกุลในองค์ประกอบ จากสายโซ่พันธะเคมียาว ๆ กลายเป็นสายโซ่สั้นลงส่วนที่เป็นองค์ประกอบ คาร์บอนระเหยได้ จะกลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิง และบางส่วนที่ถูกควบแน่นจะกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ [10] ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) โดยทั่วไปจะเป็นดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. ปฏิกริยาหลักของการไพโรไลซิส [11]



## 2. ปฏิกริยารองของการไพโรไลซิส [11]



กระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง ดังนี้ [12]

1. ช่วงก่อนการสลายด้วยความร้อน (Pre-pyrolysis) คือ ช่วงอุณหภูมิจาก 120-200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้จะมีการจัดองค์ประกอบภายในวัสดุดิบใหม่ คือ องค์ประกอบน้ำในวัสดุดิบ จะระเหยออกไป มีการทำลายพันธะในโมเลกุลของวัสดุดิบบางส่วนและเริ่มมีอนุมูลอิสระ (Free radical) เกิดขึ้น รวมทั้งยังมีการเกิดหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxy group) และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide group) ขึ้น เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ คือน้อยกว่า 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน โครงสร้างภายในของชีวมวลจะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการการแยกสลายด้วยความร้อนวัสดุดิบชนิดเดียวกัน แต่ไม่มีช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน ดังนั้นขั้นตอนของช่วงฟรีการแยกสลายด้วยความร้อน จึงมีความสำคัญต่อกระบวนการทั้งหมด

2. ช่วงการสลายส่วนที่เป็นของแข็ง เป็นขั้นตอนหลักของกระบวนการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการเกิดที่เร็วมาก และจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของกระบวนการแยกสลายตัวด้วยความร้อนโดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 300-600 องศาเซลเซียสในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่หรือเป็นสายโซ่ยาวจะเกิดการแตกตัวของพันธะ C-C และ CO พร้อมกับเกิดสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกริยา (Intermediate) สารผลิตภัณฑ์จะตั้งไฮโดรเจนจากสารอื่น แล้วกลั่นตัวเกิดปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ได้เป็นถ่านโค้ก ในขณะที่ถ่านนี้ไม่เกิดปฏิกริยาก็คงกลายเป็นถ่านชาร์ (Charcoal) ไปในที่สุด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำมันถาร์

(Tar-oil) จะผ่านกระบวนการแตกตัว (Cracking) และถูกทำให้เป็นก๊าซ ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ ต่อไป

### 2.4.1 กลไกการเกิดไพโรไลซิส [13]

กระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งประเภทตามอัตราการให้ความร้อนชีวมวลได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิสอย่างช้า (Slow pyrolysis) และกระบวนการไพโรไลซิสอย่างเร็ว (Fast pyrolysis) ซึ่งกระบวนการทั้งสองมีผลต่อการแตกออกของพันธะเคมีของโครงสร้างที่ซับซ้อนของชีวมวล และมีความสัมพันธ์กับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

2.4.1.1 กระบวนการไพโรไลซิสอย่างช้า (Slow pyrolysis) เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนให้แก่ชีวมวลอย่างช้า ๆ ในช่วงระยะเวลามากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส และที่อัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที โดยปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนแก่ชีวมวลอย่างช้าจะสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ที่อุณหภูมิ 20-100 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะดูดซับความร้อนและทำให้แห้ง โดยความชื้นในชีวมวลจะถูกทำให้กลายเป็นไอน้ำ จนกระทั่งชีวมวลถูกทำให้แห้ง
2. ที่อุณหภูมิ 100-250 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) น้ำ และกรดอะซิติก (Acetic acid)
3. ที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน รวมถึงของเหลวทาร์ (Liquid tar)
4. ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพ (Biochar)

2.4.1.2 กระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว (Fast pyrolysis) เป็นกระบวนการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิส 600-1,000 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนในช่วง 10-100 องศาเซลเซียสต่อวินาที รักษาอุณหภูมิการไพโรไลซิส ในช่วงระยะสั้นๆ กระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว มักได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูง

ไพโรไลซิส สามารถเข้าใจได้โดยศึกษาพฤติกรรมขององค์ประกอบแต่ละตัว ที่มีอยู่ภายในชีวมวล ได้แก่ พอลิเมอร์ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกัน กลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขององค์ประกอบต่างๆ ในชีวมวลดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1. กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลส (Cellulose pyrolysis)

การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสนั้นเกิดขึ้นจะทำให้มีการแตกพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic) ที่บริเวณขอบเขตระหว่างโครงสร้างรูปผลึกและอสัณฐานด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ทำให้อัตราการพอลิเมอไรเซชันลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1000 หน่วย เหลือ 200 หน่วย ในโครงสร้างทั้งที่เป็นรูปผลึกและอสัณฐาน สายของพอลิเมอร์จะไม่จับตัวเข้าคู่กันซึ่งในโครงสร้าง เซลลูโลสรูปผลึกจะมี

การเปลี่ยนรูปไปเป็นพวกเลวโกลูโคซาน (Levoglucosan) ส่วนในโครงสร้างอสังฐานจะมีการแตกของสายเซลลูโลสเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมไฮโดรเจนจากอะตอมของคาร์บอน ทำให้มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (Cross link) ได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกถ่านชาร์ (Char)

### 2. กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose pyrolysis)

การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของก๊าซมากกว่าและน้ำมันหรือน้อยกว่าเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาที่ทำให้ได้สารที่สามารถควบแน่นได้จะพบว่ามัลักษณะเช่นเดียวกับเซลลูโลส โดยกลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอนเริ่มจากการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ไปเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ แล้วตามด้วยการสลายตัวไปเป็นสารระเหยได้ ในช่วงแรกจะมีการแตกสลายพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมและออกซิเจนอะตอมไปเป็นเพนโตซาน (Pentosan) ที่จะนำไปสู่การเกิดกรดอะซิติก ฟอรั่มลดีไฮด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ไพโรไลซิสของเซลลูโลสและลิกนิน

### 3. กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน (Lignin pyrolysis)

ลิกนินเป็นโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างต่างๆ มาประกอบรวมกันจึงทำให้มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้หลายทางที่จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้ ซึ่งชนิดของชีวมวล และภาวะที่ใช้ในการทดลองจะส่งผลต่อการไพโรไลซิส

## 2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส [14,15]

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสมีอยู่หลายประการ เช่น ชนิดของวัตถุดิบ ขนาดของวัตถุดิบ ความดัน อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อนและรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ อัตราการให้ความร้อน เพราะปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่ออัตราการให้ความร้อนแตกต่างกันออกไป จะเกิดความแตกต่างทางด้านคุณภาพและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยสามารถอธิบายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการไพโรไลซิส ได้ดังนี้

1. ชนิดของวัตถุดิบ โครงสร้างของชีวมวลแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยชนิดของชีวมวลแต่ละชนิดมีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ยกตัวอย่างสารชีวมวลที่เป็นไม้ จะมีองค์ประกอบของเซลลูโลสสูง เมื่อทำการไพโรไลซิสเซลลูโลสจะเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็วกลายเป็นสารระเหยและแก๊ส ในขณะที่ชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูง จะเกิดการย่อยสลายอย่างช้า ๆ และให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นถ่านชีวภาพ

2. ขนาดของวัตถุดิบ เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งขนาดวัตถุดิบมีขนาดเล็ก จะทำให้เกิดกระบวนการสลายด้วยความร้อนแบบทุติยภูมิลดลง นั่นคือปฏิกิริยาระหว่างไอสารกับของแข็งทำปฏิกิริยาลดลง เพราะเมื่อขนาดของวัตถุดิบมีขนาดเล็กจะเกิดการกลายเป็นถ่าน

เอกสารชีวภาพได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น ถ้าขนาดของวัตถุดิบมีขนาดใหญ่ กระบวนการสลายด้วยความร้อนและการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกลายเป็นถ่านชีวภาพจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ จากผิวนอกไปสู่แกนกลางชีวมวล ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพและแก๊สมากขึ้น โดยผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่จะมีความหนืดมากกว่าน้ำมันที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนของวัตถุดิบที่มีขนาดเล็ก

3. อัตราการให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส ถ้าอัตราการให้ความร้อนเร็วทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้เกิดขึ้นมาก แต่จะได้ถ่านชาร์น้อยลง และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลได้ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้น

4. อุณหภูมิในการไพโรไลซิส ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ การไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นแรกที่อุณหภูมิมิระหว่าง 200-300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอนและน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สองอุณหภูมิมิระหว่าง 300-500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวที่ปลดปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สามอุณหภูมิมิระหว่าง 500-800 องศาเซลเซียส จะมีการไล่แก๊สออกอีกเป็นครั้งที่สอง พร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์รวมถึงถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

5. ความดัน (Pressure) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์สารระเหยได้ กล่าวคือเมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์สารระเหยที่ได้มีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าความดันต่ำจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สารระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) จะเกิดขึ้นได้ดีที่ความดันสูงจึงจะมีผลให้เกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ถ้าให้ความดันต่ำปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นแก๊สจะลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำพวกของเหลวทาร์ (Liquid tar) และถ่าน (Charcoal) เพิ่มมากขึ้น

6. ภาวะบรรยากาศ (Atmosphere) ภาวะบรรยากาศของปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาไพโรไลซิส ในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนหรือที่เรียกว่า ไฮโดรไพโรไลซิส (Hydropyrolysis) สามารถทำให้เพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยได้และช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

7. เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิส (Pyrolysis time) เวลาในการทำปฏิกิริยาต้องนานเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ หากเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้อง ไพโรไลซิสน้อยเกินไป การเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบเริ่มต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ก็จะทำได้ไม่สมบูรณ์ แต่หากเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิสมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านมีแนวโน้มค่าของร้อยละคาร์บอนในองค์ประกอบลดลง และผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยมีปริมาณน้อยลง

8. อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas) ถือเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากแก๊สตัวพาถือเป็นแก๊สที่พาสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส ชีวมวลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังชุดควบแน่นและกลั่นตัวกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ง่าย กล่าวคือที่มีอัตราการไหลของแก๊สตัวพาสูงจะทำให้เกิดการพาของสารระเหยได้ดี ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณมากต่างจากอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ต่ำจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณน้อย [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

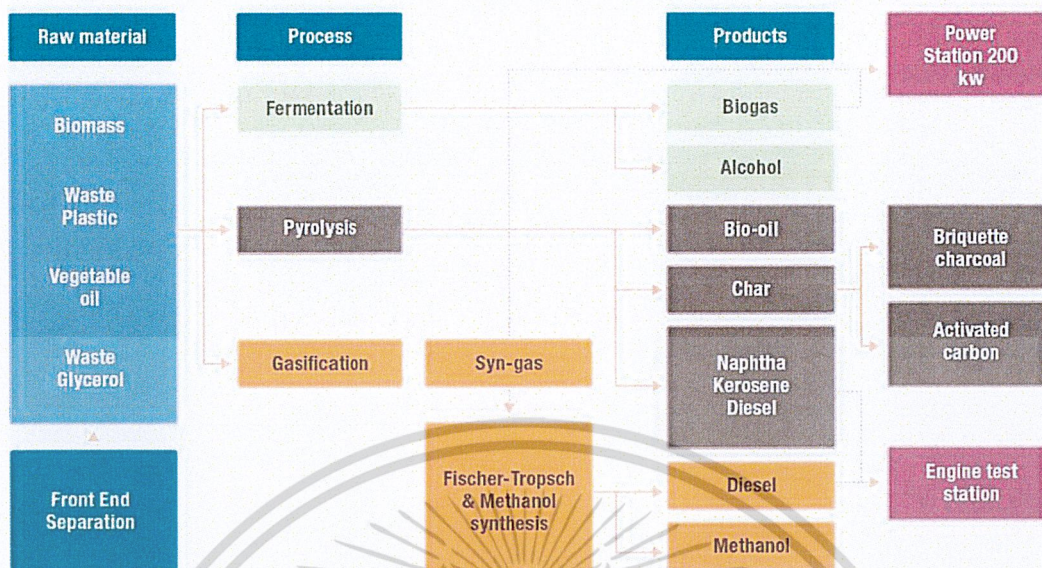
### 2.4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ ถ่าน น้ำมันและแก๊สไม่กลั่นตัว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เนื่องจากอยู่ในสถานะของเหลวที่มีข้อดีในด้านการจัดเก็บและการขนส่ง แสดงแผนภาพการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส แสดงดังรูปที่ 2.2

2.4.3.1 ถ่าน มักถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้สำหรับผลิตความร้อนไอน้ำ และไฟฟ้าถ่านที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องปฏิกรณ์ภายในกระบวนการโดยค่าความร้อนของถ่านมีค่า 15-30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกันโดยนำไปใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ นอกจากนี้ถ่านยังมีคุณสมบัติที่ดีเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของดินดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนาถ่านจากกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อใช้เป็นสารปรับปรุงดินสำหรับเกษตรกร

2.4.3.2 น้ำมัน จากกระบวนการไพโรไลซิสมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ มีความหนาแน่นประมาณ 1.2 กิโลกรัมต่อลิตร มีความหนืดสูง มีความเป็นกรดทำให้มีคุณสมบัติกัดกร่อน อุณหภูมิจุดติดสูง มีความร้อน 15-18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม มีคุณสมบัติไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำมันจากปิโตรเลียม นอกจากนี้หากเติมน้ำลงไปน้ำมันจะแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ละลายน้ำ (Aqueous phase) และส่วนไม่ละลายน้ำหรือละลายในสารอินทรีย์ (Organic phase) น้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย วิธีการที่เหมาะสมที่สุดคือ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) หรือกังหันแก๊ส (Gas turbine) สำหรับเผาไหม้เพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ [16]

2.4.3.3 แก๊สไพโรไลซิส (Pyrolysis gas) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ซึ่งเกิดจากแก๊สที่ไม่ผ่านการควบแน่น เช่น แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ), แก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) และแก๊สที่มีมวลโมเลกุลต่ำ โดยแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีค่าความร้อนประมาณ 7.5 เมกะจูลต่อลิตร ซึ่งค่าความร้อนนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการอบแห้ง หรือสามารถเป็นนำมาใช้เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า [17]



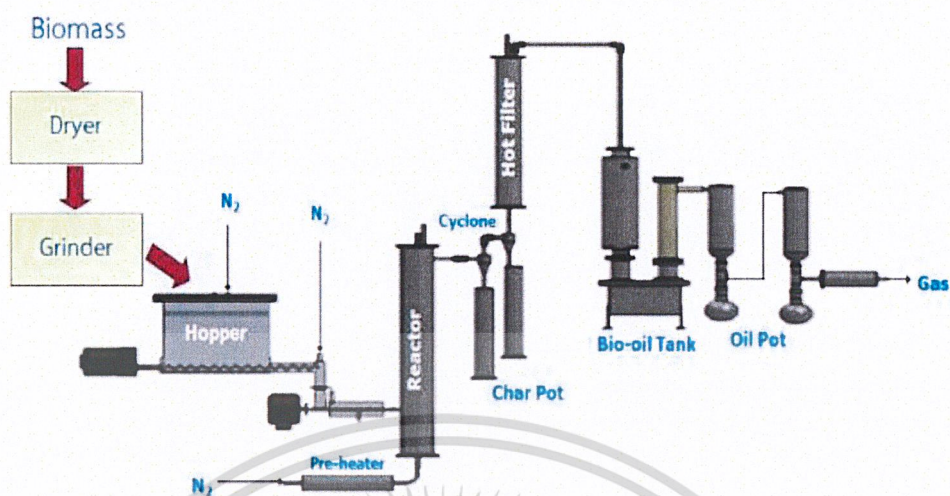
รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสและการนำไปใช้ประโยชน์ [18]

#### 2.4.4 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชิงเคมีความร้อน โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor) และเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed bed Reactor) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ [19]

##### 1. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำการป้อนอากาศจากส่วนล่างขึ้นด้านบน ซึ่งแรงดันของอากาศจะพาอนุภาคเกิดการลอยตัวและหมุนในเครื่องปฏิกรณ์อย่างมีสมดุลและสม่ำเสมอ และมีอีกส่วนหนึ่งเกิดการรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟอง ทำให้เกิดการแทรกตัวบริเวณผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุดเมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นชีวมวลจะเกิดการลอยตามขึ้นผสมกัน [19] โดยแสดงดังรูปที่ 2.3

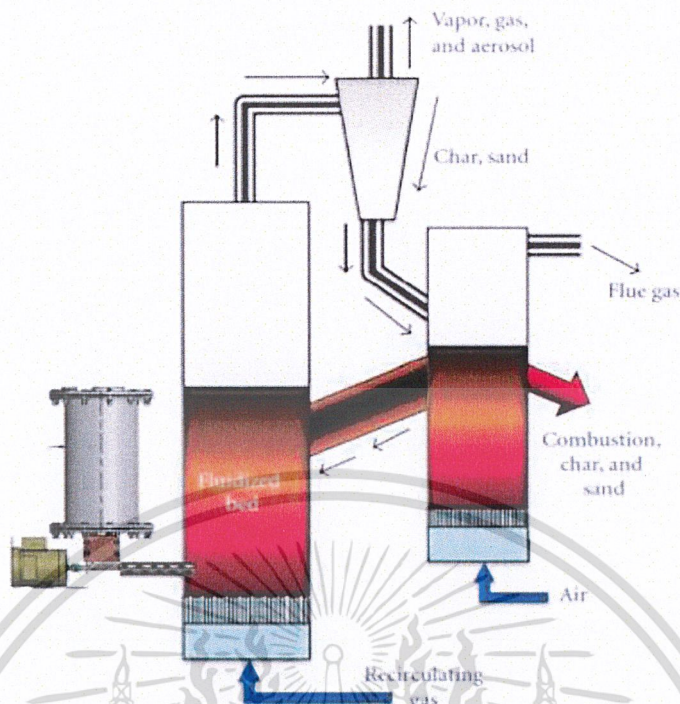


รูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพองอากาศ [20]

## 2. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคแขวนลอยหมุนวนเวียนอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์ที่มีกระแสสูงและจะมีกระแสสูงขึ้นเรื่อยๆจนเกิดส่วนที่หลุดออกไป โดยส่วนที่หลุดออกไปจะเกิดการหมุนเวียนกลับมาใหม่ด้วยไซโคลน กระบวนการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนเป็นกระบวนการหนึ่งที่เป็นที่การสัมผัสกันระหว่าง แก๊สและของแข็ง ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกโดย Winkler และถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1930 โดยปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการต่าง ๆ โดยเฉพาะกระบวนการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking, FCC) เนื่องจาก เทคนิคฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน มีข้อดีคือ มีอัตราการถ่ายโอนของมวลและความร้อนระหว่างแก๊ส และของแข็งสูง มีการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ และเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่อง เหมาะกับการใช้งานในระบบอุตสาหกรรม [21] แสดงดังรูปที่ 2.4

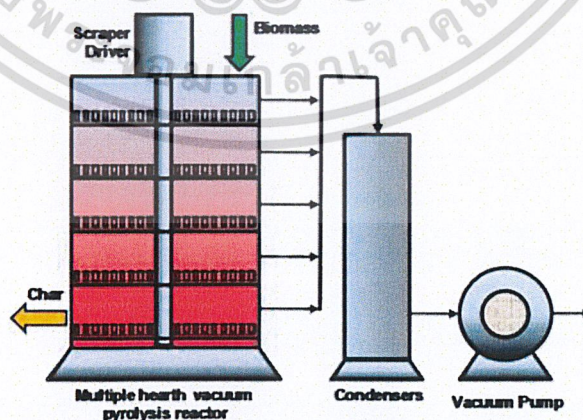
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน [19]

### 3. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบให้มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้สลายตัวของชีวมวล หรือการเผาไหม้ ภายใต้ภาวะความดันต่ำและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์ที่ยาวนาน ซึ่งต่างจากการทำไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) โดยแสดงดังรูปที่ 2.5

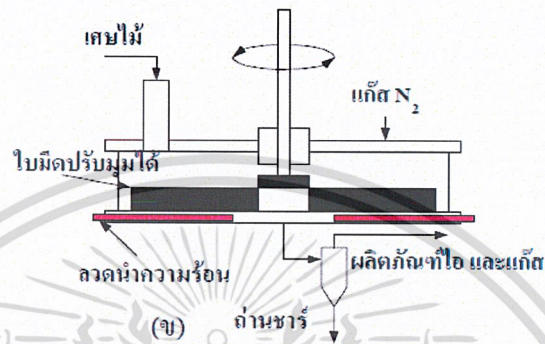


รูปที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor)

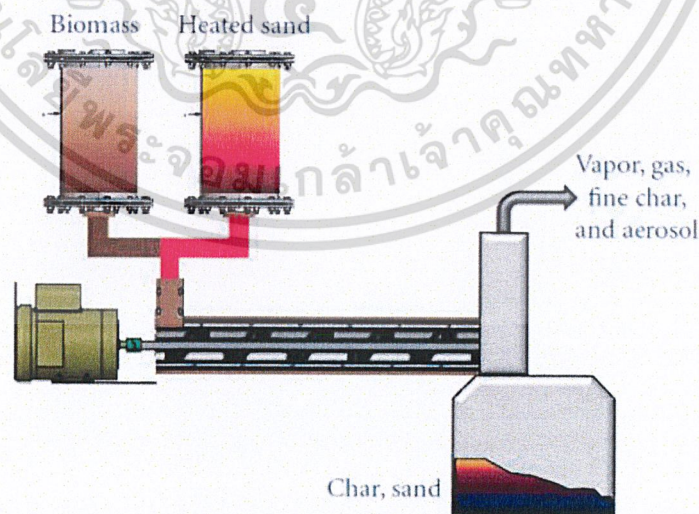
เป็นเครื่องที่อาศัยหลักการรีดิวต์วัตถุพร้อมกับให้ความร้อน กล่าวคือ เมื่อป้อนวัตถุดิบลงมา วัตถุดิบจะถูกใบมีดกรีดบนพื้นผิวร้อน ทำให้ส่วนที่ได้รับความร้อนเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นไอ และแก๊สจะลอยออกมาเข้าสู่เครื่องไซโคลอน เพื่อแยกไอกับถ่านชาร์ออกจากกัน จากนั้นไอน้ำมันจะเข้าสู่หน่วยควบแน่นต่อไป [4] แสดงได้ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ [4]

#### 5. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรู (Auger reactor)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีแก๊สตัวพาและอุณหภูมิที่ใช้งานต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำงานอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูจะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ [19] โดยแสดงดังรูปที่ 2.7

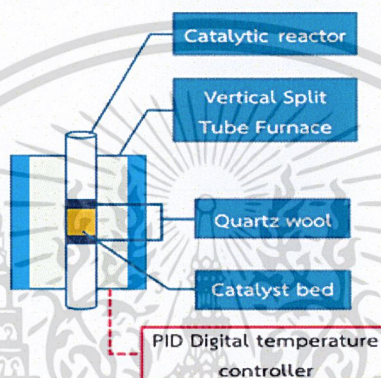


รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรู [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed bed Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการออกแบบอย่างง่าย โดยให้มีการบรรจุชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ ชีวมวลจะไม่มีเคลื่อนที่ขณะที่ถูกให้ความร้อนและกระทั่งเกิดการแตกตัวจนหมด สิ่งเคลื่อนที่ในปฏิกรณ์คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหลซึ่งไหลออกจากระบบได้ โดยการนำพาของแก๊สเฉื่อย ด้วยความดันภายในหรือด้วยการดูดออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นปฏิกรณ์อย่างง่ายที่สุด จึงนิยมใช้กันมากในระดับการทดลองของห้องปฏิบัติการ การทดสอบการเกิดผลิตภัณฑ์เบื้องต้น ไม่ต้องใช้ชีวมวลในปริมาณมาก [17] แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเบดคงที่ [24]

## 2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [25]

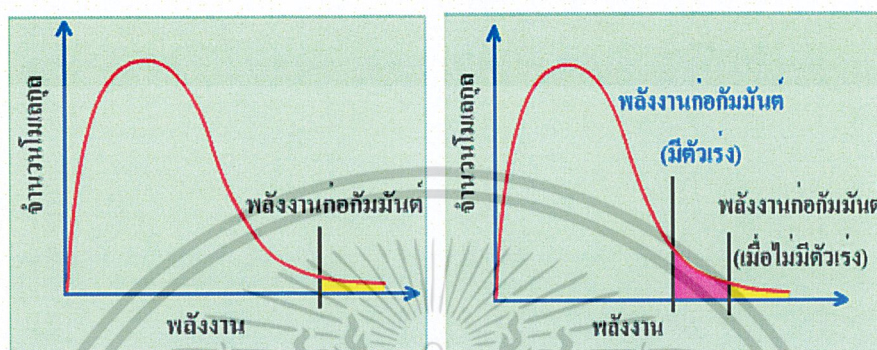
เป็นสารที่เติมลงไปในปฏิกิริยา โดยสารเหล่านี้จะไม่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาแต่จะมีผลไปลดค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาแต่จะมีผลไปลดค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยานั้นเกิดได้ง่ายมากขึ้น และหลังจากการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ลงไปจะยังคงมีสมบัติและปริมาณเหมือนเดิม โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ เอนไซม์ต่าง ๆ ในร่างกายของเราซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้เกิดการย่อยอาหารได้เร็วมากขึ้น เป็นต้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในบางกรณี การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยเพิ่มอุณหภูมิหรือความเข้มข้นของสารตั้งต้น อาจไม่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติ วิธีที่เหมาะสมที่สุดคือ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป เช่น การเตรียมแก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) จากการเผาโพแทสเซียมคลอเรต ( $KClO_3$ ) จะได้  $O_2$  ค่อนข้างช้า ถ้าเติมแมงกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ ) ลงไปด้วย  $MnO_2$  จะช่วยเร่งให้เกิด  $O_2$  ได้เร็วขึ้น แต่สุดท้ายแล้วมันเองจะไม่มีเปลี่ยนแปลง มีเพียง  $KClO_3$  เท่านั้นที่เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ คือ  $KCl$  และ  $O_2$

เอกสารนี้เราจึงให้ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยาว่าเป็นสารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นโดยที่สารตัวเร่งไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะเข้าทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นสารมัธยันตร์ (intermediate) แต่ก็กลับคืนสู่รูปเดิมได้ในปฏิกิริยาต่อขั้นตอนต่อ ๆ ไป

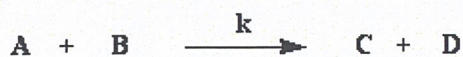
การอธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ต้องใช้ทฤษฎีการชน และกราฟการกระจายอนุภาคของแมกซ์เวลล์-โบลซ์มันน์ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.9



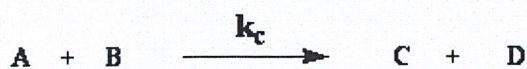
รูปที่ 2.9 การกระจายอนุภาคของแมกซ์เวลล์-โบลซ์มันน์ [25]

จากรูป การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา จะสังเกตเห็นว่ามีบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป สิ่งที่เปลี่ยนแปลงไป คือ ตำแหน่งของพลังงานก่อกัมมันต์เลื่อนมาทางซ้ายมากขึ้น จำนวนอนุภาคทางขวาของพลังงานก่อกัมมันต์มีมากขึ้น จึงเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้เป็นตัวลดหรือทำให้พลังงานก่อกัมมันต์ลดลง แต่เป็นวิถี (Pathway) หรือเส้นทางเลือกซึ่งมีพลังงานก่อกัมมันต์ที่ต่ำกว่าพลังงานก่อกัมมันต์เดิม ที่กล่าวเช่นนั้นได้ก็เพราะอนุภาคที่มีพลังงานสูง ก็ยังสามารถชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะเดิมที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาได้

ถ้าพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป จะเป็นดังตัวอย่างต่อไปนี้ สมมติว่าปฏิกิริยามีค่าคงที่อัตราเป็น  $k$  และมีพลังงานก่อกัมมันต์เป็น  $E_a$  ดังสมการ

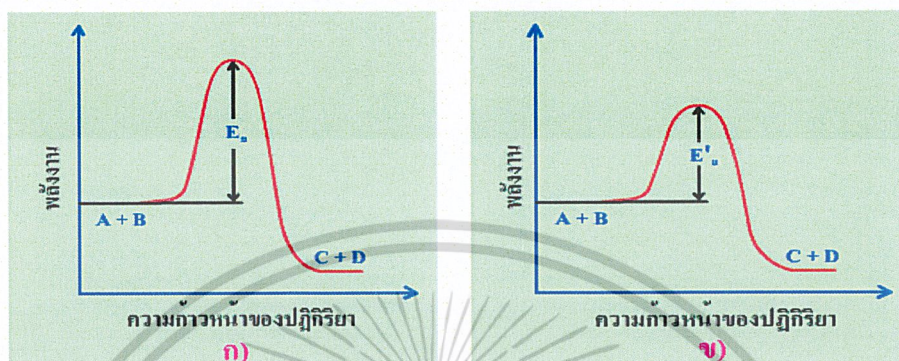


ถ้าใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปด้วย จะได้ค่าคงที่อัตราเป็น  $k_c$  ซึ่งเรียกว่า ค่าคงที่อัตราเมื่อถูกเร่ง (catalytic rate constant)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกร่งจะสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่ง เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มเส้นทางที่มีพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่พลังงานรวมของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์จะไม่เปลี่ยนแปลง แสดงดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา [25]

จากรูป จะเห็นได้ว่า พลังงานก่อกัมมันต์  $E_a$  ลดลงเป็น  $E'_a$  และพลังงานก่อกัมมันต์ลดลงทั้งปฏิกิริยาที่เกิดไปข้างหน้าและย้อนกลับ ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งปฏิกิริยาที่เกิดไปข้างหน้าและปฏิกิริยาที่เกิดย้อนกลับ

## 2.6 โดโลไมต์ (Dolomite)

โดโลไมต์ (Dolomite) เป็นชื่อแร่ชนิดหนึ่ง รูปผลึกแบบหกเหลี่ยมผลึกของแร่ จะพบในรูปแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ผิวหน้าผลึกส่วนมากจะโค้ง บางครั้งจะโค้งเป็นรูปคล้ายอานม้า ผลึกในแบบอื่นมีพบได้บ้างเล็กน้อย ซึ่งอาจพบเป็นเม็ดหยาบ ๆ ไปจนกระทั่งเม็ดเล็กเกาะกันแน่น มีสูตรเคมี  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  มี  $\text{CaO}$  30.4%  $\text{MgO}$  21.7% และ  $\text{CO}_2$  47.9% โดยปกติโดโลไมต์ มีสัดส่วนของ  $\text{CaCO}_3$  ต่อ  $\text{MgCO}_3$  ประมาณ 1:1 ถ้ามี Ferrous iron เข้ามาแทนที่แมกนีเซียมและปริมาณมากกว่าแมกนีเซียมแล้วจะเรียก แองเคไรต์ (Ankerite) พบในหินปูนโดโลมิติก (Dolomitic limestone) หรือในหินอ่อนโดโลมิติก (Dolomitic marble) โดโลไมต์ที่พบมีมวลขนาดใหญ่ เป็นการกำเนิดแบบทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากหินปูนที่มีอยู่เดิมถูกแทนที่ด้วยธาตุแมกนีเซียม หรือเกิดเป็นแร่ในสายตะกั่วหรือสังกะสีซึ่งตัดผ่านหินปูน [26]

### 2.6.1 สมบัติทั่วไปของโดโลไมต์ [19]

โดโลไมต์จะมีลักษณะทางกายภาพ เป็นผงมีสีขาว ผิวมันแววมืดเหมือนแก้ว ทึบแสง แสดงดังรูปที่ 2.11 ความแข็ง ตามมาตราฐานของ Mohs' scale ประมาณ 3.5 ถึง 4 ความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.82 ถึง 2.95 และ ความพรุนอยู่ที่ 8.6 และมีสมบัติทางเคมี คือ สามารถเกิดการทำปฏิกิริยาในกรดเกลือที่ เจือจางได้ดี และเมื่อนำไปละลายน้ำ จะให้ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง pH 9.0 ถึง 10.71 โดยสามารถพบแร่โดโลไมต์ได้ทั่วทั้งประเทศไทยและพบได้หลายจังหวัด 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



รูปที่ 2.11 ตัวแร่ปฏิกิริยาโดโลไมต์ [33]

### 2.6.2 ประโยชน์ของโดโลไมต์ [33]

ประโยชน์ของโดโลไมต์ มีหลายประการ ดังนี้

1. เป็นหินคลุก (Aggregate) สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างงานคอนกรีตและปูนซีเมนต์ทนต่อการขัดสี (Abrasion) ทนต่อการผุสลายตัวมี roundness สูง แต่จะต้องไม่มีสารพวกดิน ดินดาน และไฟรต์ ซึ่งจะเป็นตัวทำให้แร่โดโลไมต์เกิดสภาพเสื่อม
2. เป็นสารเชื้อใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เพื่อเป็นตัวดึงซิลิกาแมงกานีส (Silica-manganese) ให้กลายเป็นสารมลทิน ลอยขึ้นบนผิวของน้ำโลหะถลุง เป็นการแยกขจัดสารมลทิน
3. ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกชนิดพิเศษ
4. ใช้ปรับความเป็นกรดเป็นด่างของดินหรือการแก้ดินเปรี้ยวในอุตสาหกรรมการเกษตร และใช้เป็นปุ๋ยของพืชในขณะเดียวกัน โดยแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบของคลอโรฟิลล์ (Cholorophy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวช่วยย่อยอาหารของพืช นอกจากนี้ใช้ปรับสภาพดินกันบ่อในบ่อเลี้ยง กุ้ง และในบ่อเลี้ยงปลา ให้เหมาะแก่การเลี้ยงสัตว์น้ำ ป้องกันการเกิดก๊าซไข่เน่า

5. ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น ซีโครไตเทียม เกลือแมกนีเซียม
6. ใช้ในอุตสาหกรรมใยเทียม ผสมเส้นใยพลาสติกและส่วนผสมทำให้เซอร์ลากันความร้อน
7. ใช้ทำหินประดับ (Dimension stone) เช่น โด๊ะหินขัดแท่งสีเหลี่ยมลูกตาทนต่อสภาพบรรยากาศโล่งแจ้ง ทนต่อการผุกร่อน (Weathering) และไม่มีสารเจือปนที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับสภาพภายนอก ทำให้เกิดความคงทนและคงรูปของหิน บางครั้งใช้เป็นหินเคลือบประดับสวนและตู้ปลา ซึ่งจะให้สีสันดึงดูดผู้สังเกต
8. ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นวัสดุทนความร้อน (Refractory)
9. ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นตัวฟอกขาวและวัสดุอุดเยื่อกระดาษ (Filter)
10. ใช้เป็นสารกรองน้ำให้บริสุทธิ์ (Filter)
11. ใช้ในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ใช้ปรับสภาพความเป็นกรดและต่างในกระบวนการผลิต
12. ผลิตโลหะแมกนีเซียม (Magnesium metal)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จักรพล โปธิประสิทธิ์ [12] ศึกษาการแยกสลายกากตะกอนที่ได้จากโรงกำจัดน้ำเสียแบบแอกทีฟเวจเตตัสส์ลัตช์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ด้วยความร้อน ทำการวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของกากตะกอน ซึ่งขนาดอนุภาคของตัวอย่างกากตะกอนน้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร ทำการศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ของการแยกสลายด้วยความร้อน คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการแยกสลายด้วยความร้อนที่ 400 450 500 550 600 และ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 50 100 150 200 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนคงที่เท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าที่อุณหภูมิสุดท้ายของการแยกสลายด้วยความร้อน 500 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 26.90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวแยกออกเป็น 2 ชั้น คือ ส่วนที่เป็นชั้นน้ำและชั้นน้ำมันชีวภาพ ซึ่งสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดเช่นกัน เมื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้ พบว่า น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนประมาณ 39.80 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวและวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) ซึ่งสมบัติทางกายภาพที่ได้แตกต่างจากเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ จึงสรุปได้ว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้ สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งของเคมีภัณฑ์หรือถ้าจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงควรทำการ

เอกสารนี้ปรับปรุงคุณภาพก่อนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mustafa K. Hossain et al. [22] ศึกษาการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย เพื่อการใช้งานทางชีวภาพและการเกษตร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่มีต่อการผลิตกากตะกอนน้ำเสียชีวภาพและประเมินคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการใช้งานทางการเกษตร กากตะกอนน้ำเสียที่รวบรวมจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน ถูกไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบห้องปฏิบัติการ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไพโรไลซิส ในช่วงจาก 300-700 องศาเซลเซียส ผลผลิตของถ่านชีวภาพ (Char) จะลดลง ถ่านชีวภาพที่ถูกผลิตที่อุณหภูมิต่ำจะมีสภาพเป็นกรด ในขณะที่อุณหภูมิสูงเป็นด่าง ในธรรมชาติพบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนลดลงในขณะที่ธาตุอาหารเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของโลหะติดตามที่มีอยู่ในกากตะกอนน้ำเสียแปรผันตามอุณหภูมิ และพบว่าส่วนใหญ่จะถูกเสริมสมรรถนะในกระบวนการทางชีวภาพ

อดิศักดิ์ ปัตติยะ [23] ศึกษาผลของการลดแร่ธาตุของชีวมวลที่มีต่อการผลิตไบโอออยล์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกได้ทำการศึกษาถึงผลของวิธีการลดแร่ธาตุที่มีต่อปริมาณเถ้าในชีวมวล เพื่อหาวิธีการที่สามารถลดปริมาณเถ้าได้มากที่สุด โดยใช้ชีวมวล 4 ชนิด ได้แก่ ใบอ้อย ยอดอ้อย เหง้ามัน สำปะหลังและลำต้นมันสำปะหลัง วิธีการลดแร่ธาตุแบ่งออกเป็น 2 เทคนิคคือ เทคนิคการบดย่อยตามด้วยการคัดขนาด และเทคนิคการล้างด้วยน้ำเปล่าและสารละลายกรด โดยใช้อุณหภูมิ 30-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-24 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าชีวมวลที่ขนาดน้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร มีปริมาณเถ้ามากที่สุด ขณะที่ชีวมวลที่อยู่ในช่วงขนาด 0.25-2.00 มิลลิเมตร มีปริมาณเถ้าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ผลการล้างชีวมวล พบว่าใบอ้อยและยอดอ้อยมีปริมาณเถ้าลดลงมากที่สุดเมื่อล้างด้วยน้ำเปล่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยปริมาณเถ้าลดลง ถึงร้อยละ 65.35 และ 69.01 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณ เถ้าในเหง้าและลำต้นมันสำปะหลังลดลงมากที่สุดเมื่อใช้วิธีการล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 0.05 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีปริมาณเถ้าลดลงถึงร้อยละ 58.42 และ 64.25 ตามลำดับ ในส่วนที่สองของงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ชีวมวลที่ผ่านการล้างด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่าการลดแร่ธาตุในชีวมวลโดยการล้างทำให้ปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นได้ โดยเทคนิคการล้างที่ให้ผลดีที่สุดคือการล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.05 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากใบอ้อย ยอดอ้อย เหง้ามันสำปะหลังและลำต้นมันสำปะหลัง เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.02 4.64 3.38 และ 2.94 ตามลำดับ และนอกจากนี้ยังพบว่าการลดแร่ธาตุในชีวมวลมีผลต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้ชัดเจน โดยเทคนิคการลดปริมาณเถ้าบางเทคนิคทำให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มีคุณสมบัติดีขึ้น ขณะที่บางเทคนิคทำให้ได้น้ำมันชีวภาพมีคุณสมบัติแย่ง และชีวมวลต่างชนิดกันก็เหมาะกับเทคนิคการลดปริมาณแร่ธาตุที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นีรา วงศ์ทยานวัตร และ มาลีสันติคุณภรณ์ [24] ศึกษาปฏิกิริยาไพโรไลซิสของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ทั้งที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิช่วง 300-400 องศาเซลเซียส ภายใต้แก๊สไนโตรเจน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมี 2 ส่วน คือ แก๊สและของเหลว ผลิตภัณฑ์ของเหลวแบ่งเป็นน้ำมันที่มีคุณสมบัติคล้ายแก๊สโซลีน (C7-C10) น้ำมันเจ็ท (C11-C15) และน้ำมันดีเซล (C15-C20) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สนใจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวได้ จากผลการศึกษา ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ภายใต้สภาวะที่ใช้ศึกษา ระบบที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาให้ผลิตภัณฑ์แก๊สในปริมาณที่ใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่สำหรับระบบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าถ่านกัมมันต์มีความเหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไพโรไลซิสมากกว่าซีโอไลต์วาย สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในระบบที่มีถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้น ในส่วนน้ำมันที่มีคุณสมบัติคล้ายแก๊สโซลีน น้ำมันเจ็ทและน้ำมันดีเซลคิดเป็น 42.12 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ

Obid Tursunov. [27] ศึกษาการผลิตและการวิเคราะห์ก๊าซจากไพโรไลซิสของขยะมูลฝอยในเขตเทศบาลเมือง ด้วยซีโอไลต์และโดโลไมต์เผาเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการตรวจสอบในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งแบบคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 200–750 °C การผลิตก๊าซจากไพโรไลซิสของขยะมีความหลากหลายในช่วง 49-57 mol% ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า โดโลไมต์เผามีผลต่อผลผลิตและองค์ประกอบของก๊าซในกระบวนการไพโรไลซิสอย่างมีนัยสำคัญและเผยให้เห็นประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่จำเป็นในการเพิ่มผลผลิตก๊าซและลดผลผลิตน้ำมันชีวภาพและผลผลิตถ่าน อุณหภูมิที่สูงขึ้น 600–750 °C ส่งผลให้การแปรสภาพของขยะในการผลิตก๊าซที่สูงขึ้นด้วยการเพิ่มองค์ประกอบของ CO ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตพลังงานทดแทนและก๊าซชีวภาพ

K.Chaiwong et al. [28] การศึกษาครั้งนี้ตรวจสอบเชื้อเพลิงชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตจาก *Spirulina Sp.* โดยไพโรไลซิสแบบช้า เครื่องมือวิเคราะห์ความร้อน (TGA) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติและองค์ประกอบที่จำเป็นของสาหร่าย พบว่าอุณหภูมิสำหรับการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่ 322 °C ซึ่งต่ำกว่ามวลชีวภาพอื่น ๆ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ 125 กรัมของสาหร่าย *Spirulina Sp.* ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนจนกระทั่งอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ระหว่าง 450-600 °C พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านและน้ำมันชีวภาพมีอุณหภูมิประมาณ 500 และ 550 °C ตามลำดับ ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ ตรวจสอบด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) คาร์บอนที่ใช้งานอิมตัวของน้ำมันชีวภาพ อยู่ในช่วงของแนฟทาหนักน้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซล อัตราส่วนการใช้พลังงานของน้ำมันชีวภาพและถ่านชีวภาพ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mohammad NurullIslam et al. [29] ศึกษาการไพโรไลซิสของขยะมูลฝอย และกากเมล็ดแฟลกซ์ (Linseed) โดยดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบคงที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ น้ำมันไพโรไลซิส ถ่านชีวภาพและก๊าซ ทำการทดลองศึกษาปัจจัยที่แตกต่างกัน คือ อุณหภูมิในการไพโรไลซิส เวลาในการไพโรไลซิส และขนาดอนุภาคของชีวมวล พบว่า การไพโรไลซิสกากเมล็ดแฟลกซ์ ผลิตภัณฑ์ในส่วน of เหลวสูงสุดอยู่ที่ 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัตถุดิบแห้ง ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส เท่ากับ 500 °C ขนาดของชีวมวลที่เหมาะสมอยู่ที่ 300-600 ไมโครเมตร เวลาในการไพโรไลซิส เท่ากับ 55 นาที ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ของเหลวต่ำสุดอยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัตถุดิบแห้ง ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส เท่ากับ 400 °C ขนาดของชีวมวลที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.36 มิลลิเมตร เวลาในการไพโรไลซิส เท่ากับ 65 นาที สำหรับการไพโรไลซิสขยะมูลฝอย ผลิตภัณฑ์ในส่วน of เหลวสูงสุดอยู่ที่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัตถุดิบแห้ง อุณหภูมิในการไพโรไลซิส เท่ากับ 500 °C ขนาดของชีวมวลที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.36-2.7 มิลลิเมตร เวลาในการไพโรไลซิส เท่ากับ 120 นาที จากการศึกษาพบว่าขยะมูลฝอยชีวมวลมีศักยภาพที่จะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำมันชีวภาพ เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนต่อไป

L.A.C.Tarelho et al. [30] ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้ไพโรไลซิสของตะกอนชีวภาพจากการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและกระดาษ กระบวนการไพโรไลซิสดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยใช้สภาวะที่แตกต่างกันของอัตราการให้ความร้อน ได้แก่ 2 10 20 และ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส ได้แก่ 300 375 450 525 และ 600 องศาเซลเซียส ผลผลิตของถ่านชีวภาพอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.73 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมของกากตะกอนแห้งและลดลงเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสและอัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุในถ่านชีวภาพอยู่ในช่วง 55.9 ถึง 75.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการเพิ่มอัตราความร้อนจะช่วยลดปริมาณสารระเหยทางชีวภาพในค่าระหว่าง 14.4 ถึง 48.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนและมีค่าอยู่ในช่วง 24.7 ถึง 44.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณคาร์บอนคงที่ที่สอดคล้องกันอยู่ระหว่าง 26.2 ถึง 42.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนในถ่านชีวภาพอยู่ในช่วง 42.8 ถึง 47.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า pH ของถ่านชีวภาพอยู่ในช่วง 6.9 ถึง 11.2 และค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 5.0 mS/cm

M.U. Garba et al. [31] ศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากขานอ้อยด้วยไพโรไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 5 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การวิเคราะห์เชิงความร้อนและการทดลองได้ดำเนินการในเครื่องวิเคราะห์ความร้อนและอุณหภูมิ

เอกสารนี้แบบคงที่ (TGA) และเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ ตามลำดับ ปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุดจากการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ของ ZSM-5 และพบว่าอะโรมาติกส์ฟีนอลและกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบหลักจากการวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี-แมสสเปคโตรเมตรี (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพ น้ำมันชีวภาพจากตัวเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสมีอะโรมาติกส์และกรดโอเลอิกน้อยกว่าน้ำมันจากไพโรไลซิสที่ไม่ใช่ตัวเร่ง แต่น้ำมันไบโอจากขานอ้อยโดยใช้เร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้ เคมีคอล จำกัด โดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เวลาในการไพโรไลซิส และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ โดโลไมต์ (Dolomite) ต่อการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด คือ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) แก๊สชีวภาพ (Bio-gas) และถ่านชีวภาพ (Char)

### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

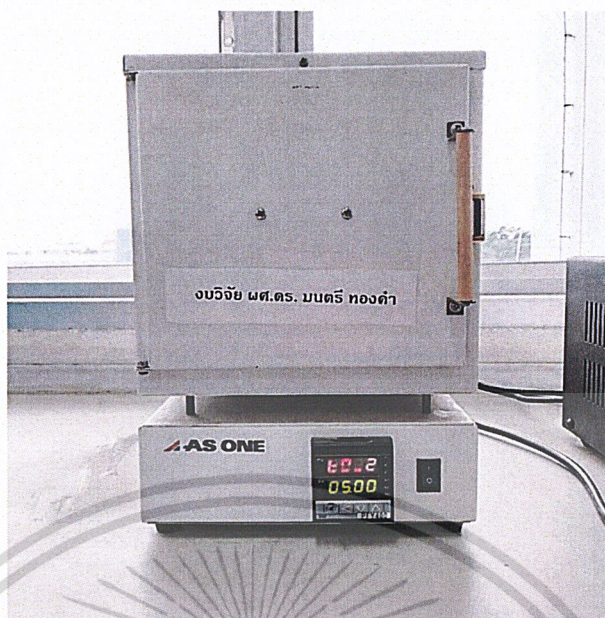
#### 3.1.1 สารตัวอย่างและสารเคมี

1. กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้ เคมีคอล จำกัด
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite)
3. แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ )
4. อะซิโตน ( $CH_3OCH_3$ ) ขนาด 2500 มิลลิลิตรเกรด คุณภาพวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS ประเทศสเปน
5. ทรายควอตซ์ ( $SiO_2$ ) ขนาด 500 กรัม บริษัท Wako Pure Chemical Industries, Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
6. ไยแก้ว (Glass wool) ขนาด 500 กรัม บริษัท Chem-Supply Pty, Ltd. ประเทศออสเตรเลีย

#### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ถุงซิปล็อค (Zip lock bag)
3. ขาตั้งและแคลมป์ (Stand and clamp)
4. ประแจแหวนข้างปากตาย (Combination wrench) ขนาด 11 12 13 14 15 19 24 27 และ 30 มิลลิเมตร
5. ปากคีบ (Forcep)
6. เตาเผาสำหรับเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (Furnace), L9/12P แสดงดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เตาเผาสำหรับเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (Furnace), L9/12P

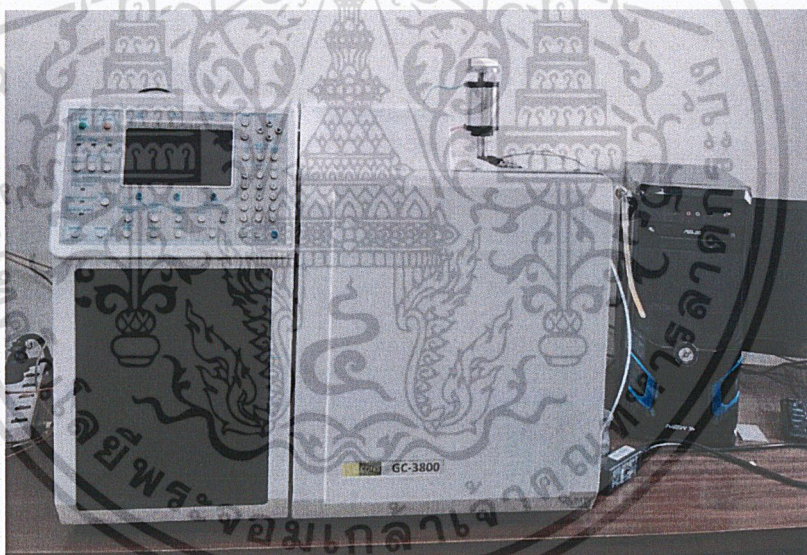
7. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Yamato บริษัท YAMATO SCIENTIFICCO., LTD. ประเทศญี่ปุ่น แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Yamato

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ปีกเกอร์แก้ว ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
9. ขวดเก็บสารขนาดเล็กฝาดำ (Vial, Black lid)
10. ถุงเก็บแก๊ส (Gas sampling bag)
11. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร (Erlenmeyer flask)
12. ซ้อนตักสาร
13. โถดูดความชื้น
14. ครกและสาก
15. ลูกยางดูดปิเปต (Rubber for pipette)
16. ม้วนเทปพาราฟิล์ม (Parafilm) ขนาด 4 นิ้ว x 125 ฟุต บริษัท BEMIS FLEXIBLE PACKAGING ประเทศสหรัฐอเมริกา
17. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (Gas Chromatography – Flame Ionization Detector, GC-FID) สำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของแก๊ส ยี่ห้อ ALLCONS รุ่น CP 3800 แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของแก๊ส

18. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) สำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของของเหลว ยี่ห้อ Chrompack รุ่น CP 9002 แสดงดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของของเหลว

19. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)
  20. เครื่องมือวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric Thermal Analyzer, TGA)
  21. เตาเผา TUBULAR FURNACE MODEL CTF12/75/700/201
  22. Tube furnace MODEL CTF ยี่ห้อ CARBOLITE
  23. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ BINDER model – FD115
  24. Bomb calorimeter Parr1341
  25. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) รุ่น FBR 60
- แสดงดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor)

### 3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ได้ดังต่อไปนี้

- 3.2.1 การออกแบบการทดลอง
- 3.2.2 การเตรียมกากตะกอนน้ำเสียและตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์
- 3.2.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของกากตะกอนน้ำเสียและตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์
- 3.2.4 การไฟโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย
- 3.2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง

#### 3.2.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ ผู้ทำการทดลอง ได้ออกแบบการทดลองเป็นการศึกษาที่ละปัจจัย (Univariate) แบบสุ่มและทำซ้ำในแต่ละการทดลอง 2 ครั้ง

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิส เท่ากับ 350 450 550 องศาเซลเซียส โดยขนาดอนุภาคของกากตะกอนน้ำเสีย เท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร อัตราการให้ความร้อน เท่ากับ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการพาของแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไฟโรไลซิส เท่ากับ 60 นาที ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาผลของอัตราการพาของแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ 40, 80, 120 มิลลิลิตรต่อนาที โดยอัตราการให้ความร้อน เท่ากับ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ขนาดอนุภาคของกากตะกอนน้ำเสีย เท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร อุณหภูมิไฟโรไลซิส เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการไฟโรไลซิส เท่ากับ 60 นาที ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

3. ศึกษาผลของเวลาในการไฟโรไลซิส เท่ากับ 60, 90, 120 นาที โดยอัตราการให้ความร้อน เท่ากับ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ขนาดอนุภาคเท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร อุณหภูมิไฟโรไลซิส เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส อัตราการพาของแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

4. ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ ร้อยละ 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก โดยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ขนาดอนุภาคเท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร อุณหภูมิไฟโรไลซิส เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส อัตราการพาของแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไฟโรไลซิส เท่ากับ 60 นาที

### 3.2.2 การเตรียมกากตะกอนน้ำเสียและตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

#### 3.2.2.1 วิธีการเตรียมกากตะกอนน้ำเสียโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้เคมีคอล

จำกัด

1. นำกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงาน ของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด มาทำการอบแห้งบนถาดอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กากตะกอนน้ำเสียบริษัทไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด

2. นำตะกอนที่ผ่านการอบแห้งแล้ว มาบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยครกและสาก
3. ทำการคัดขนาดตะกอนที่ผ่านการบดแล้วด้วยตะแกรงร่อน ให้มีขนาดอยู่ในช่วง 500-850 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.7
4. เก็บกากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการคัดแยกขนาดแล้วด้วยถุงเก็บตัวอย่าง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น



รูปที่ 3.7 ตะแกรงร่อนคัดขนาดในช่วง 500-850 ไมโครเมตร

### 3.2.2.2 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโตไลไมต์

1. นำตัวเร่งปฏิกิริยาโตไลไมต์ไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในเตาเผาตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาโตไลไมต์

2. ทำการอัดตัวเร่งปฏิกิริยาโตไลไมต์ให้เป็นเม็ด ด้วยเครื่องอัดเม็ด
3. ทำการบดตัวเร่งปฏิกิริยาและคัดขนาดตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยตะแกรงร่อน ให้มีขนาดอยู่ในช่วง 500-850 ไมโครเมตร
4. เก็บตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยถุงซิปล็อค แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของกากตะกอนน้ำเสียและตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

#### 3.2.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของกากตะกอนน้ำเสีย

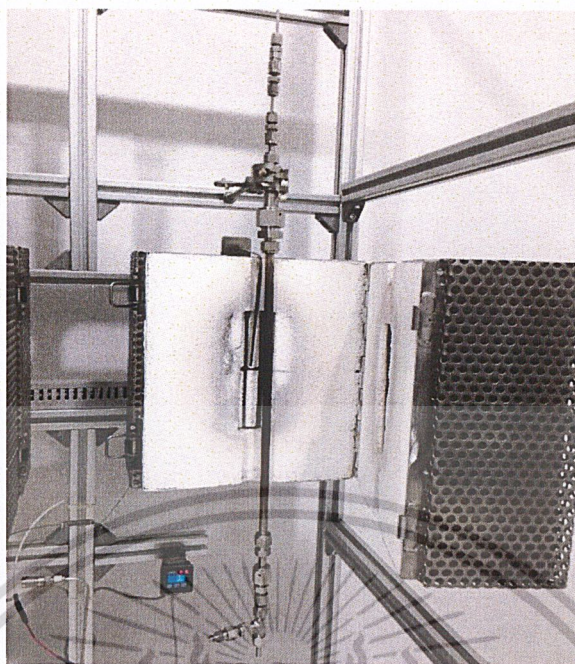
1. วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis/Differential thermal analysis, TGA/DTG)
2. วิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ (Proximate analysis) ด้วยเตาเผา TUBULAR FURNACE MODEL CTF12/75/700/201, Tube furnace MODEL CTF ยี่ห้อ CARBOLITE และ ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ BINDER model – FD115
3. วิเคราะห์หาค่าความร้อนของกากตะกอนน้ำเสีย (Heating value) ด้วยเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน Bomb calorimeter Parr 1341
4. วิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของกากตะกอนน้ำเสียด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

#### 3.2.3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

วิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของกากตะกอนน้ำเสียด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

### 3.2.4 การไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

1. ชั่งกากตะกอนน้ำเสียและทรายควอตซ์อย่างละประมาณ 1 กรัม และ 0.5 กรัม ตามลำดับ จากนั้นผสมด้วยกันภายในถุงซิปล็อค
2. ใช้ปากคีบ (Forcep) คีบใยแก้ว บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ จากนั้นบรรจุกากตะกอนน้ำเสียที่ผสมกับทรายควอตซ์ในข้อที่ 1 ลงไป แล้วจึงคีบใยแก้ว ปิดด้านบนอีกครั้งหนึ่ง
3. ขั้นตอนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ที่ให้นั้น ด้วยประแจแหวนข้างปากตายขนาด 15, 24, และ 27 มิลลิเมตร แล้วจึงติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่กับเตาปฏิกรณ์ แสดงดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่กับเตาปฏิกรณ์

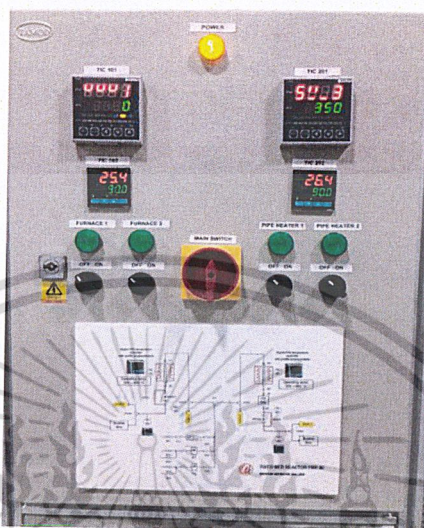
4. ขั้นตอนการของเครื่องควบแน่นด้วยความเย็น (ice trap) ด้วยประแจแหวนข้างปากตาย ขนาด 27 และ 30 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปติดตั้งกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ แซ่ส่วนควบแน่นด้วย อ่างน้ำแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.11



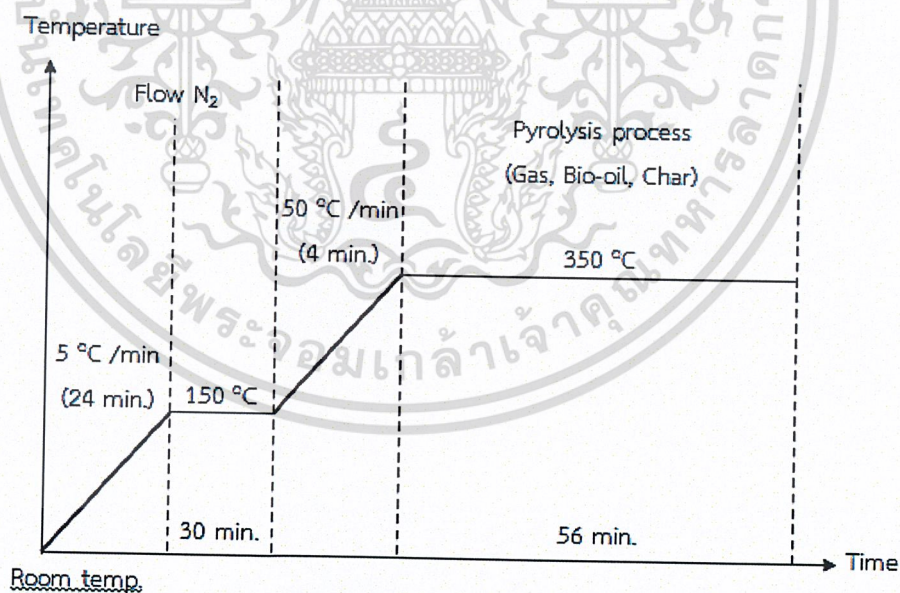
รูปที่ 3.11 เครื่องควบแน่นด้วยความเย็น (ice trap)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เปิดเครื่องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ ทำการตั้งค่าตัวแปรที่สนใจจะศึกษา โดยอุณหภูมิแรกที่ทำทดลอง คือ 350 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.12 ตั้งค่าเวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสได้ แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่



รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เปิดวาล์วถังแก๊สไนโตรเจน และเปิดอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (Rotameter) จากนั้นตรวจสอบอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนอีกครั้งให้ เท่ากับ 150 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยการจับเวลาของฟองสบู่ที่เคลื่อนที่ไปได้ 25 มิลลิลิตร เป็นเวลา 12.5 วินาที

7. ต่อถุงเก็บแก๊ส (Gas sampling bag) แล้วจึงเปิดสวิตซ์อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์และท่อนำความร้อน จากนั้นกดเริ่มให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงาน

8. เมื่อสิ้นสุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ รอให้อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เย็นลงไปที่อุณหภูมิห้อง

9. ทำการคำนวณร้อยละผลผลิตที่ได้ และทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง พร้อมทั้งทำการบันทึกผลการทดลอง

10. ศึกษาตัวแปรอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เวลาในการไพโรไลซิส และปริมาณของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการทำตามขั้นตอนที่ 1-9

### 3.2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง

#### 3.2.5.1 การคำนวณร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์

- ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านชาร์ (Char)

$$\% \text{ Yield ของ ถ่านชาร์} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านชาร์}}{\text{น้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสีย}} \times 100$$

- ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil)

$$\% \text{ Yield ของ น้ำมันชีวภาพ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำมันชีวภาพ}}{\text{น้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสีย}} \times 100$$

- ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส (Gas)

$$\% \text{ Yield ของ แก๊ส} = 100 - (\text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของถ่านชาร์} + \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ})$$

#### 3.2.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้

1. การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในส่วนของของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

2. การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาและหาปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซุซสเปเซียลตี้เคมีคอล จำกัด โดยทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ประกอบด้วย อุณหภูมิในการไพโรไลซิส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เวลาในการไพโรไลซิส ปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของกากตะกอนน้ำเสียและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรม

##### 4.1.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางกายภาพโดยวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) พบว่ากากตะกอนน้ำเสีย ประกอบไปด้วย ปริมาณความชื้น (Moisture content) เท่ากับ 1.24 เปอร์เซ็นต์ สารที่สามารถระเหยได้ (Volatiles matter) เท่ากับ 79.67 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) เท่ากับ 4.70 เปอร์เซ็นต์ และขี้เถ้า (Ash) เท่ากับ 14.39 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความร้อน (Heating value) เท่ากับ 5,412.12 แคลอรีต่อกรัม แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์	ค่า Heating value (cal/g)	ค่า Proximate analysis			
		%M	%VM	%FC	%ASH
กากตะกอนน้ำเสีย	5,412.12	1.24	79.67	4.70	14.39

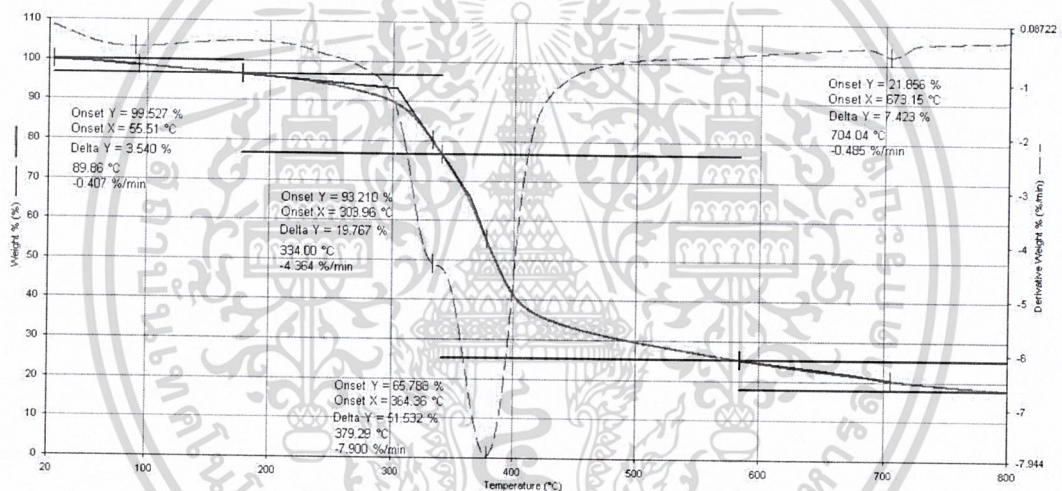
จากตารางที่ 4.1 พิจารณาปริมาณความชื้น (Moisture) ของกากตะกอนน้ำเสีย พบว่าปริมาณความชื้นมีปริมาณที่ต่ำมาก มีค่าไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพโดยการไพโรไลซิส และเมื่อพิจารณาค่าเถ้า (Ash) คือส่วนที่ไม่สามารถเผาได้หรือส่วนที่ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงได้ พบว่ามีปริมาณค่าเถ้าค่อนข้างต่ำ แสดงว่ากากตะกอนน้ำเสียนี้สามารถเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) และปริมาณสารที่สามารถระเหยได้ (Volatile matter) ซึ่งถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่บ่งบอกปริมาณเชื้อเพลิงจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไพโรไลซิสที่ได้วามากน้อยเพียงใด พบว่า ค่าปริมาณสารระเหยสูงมาก แสดงว่ากากตะกอนน้ำเสีย ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสได้เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) และน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ได้สูง ในขณะที่ค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) มีค่าต่ำ แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชีวภาพ (Char) จะได้น้อยลงตามไปด้วย [34]

#### 4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis/Differential thermal analysis, TGA/DTG)

ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis/Differential thermal analysis, TGA/DTG) ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของกากตะกอนน้ำเสียด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

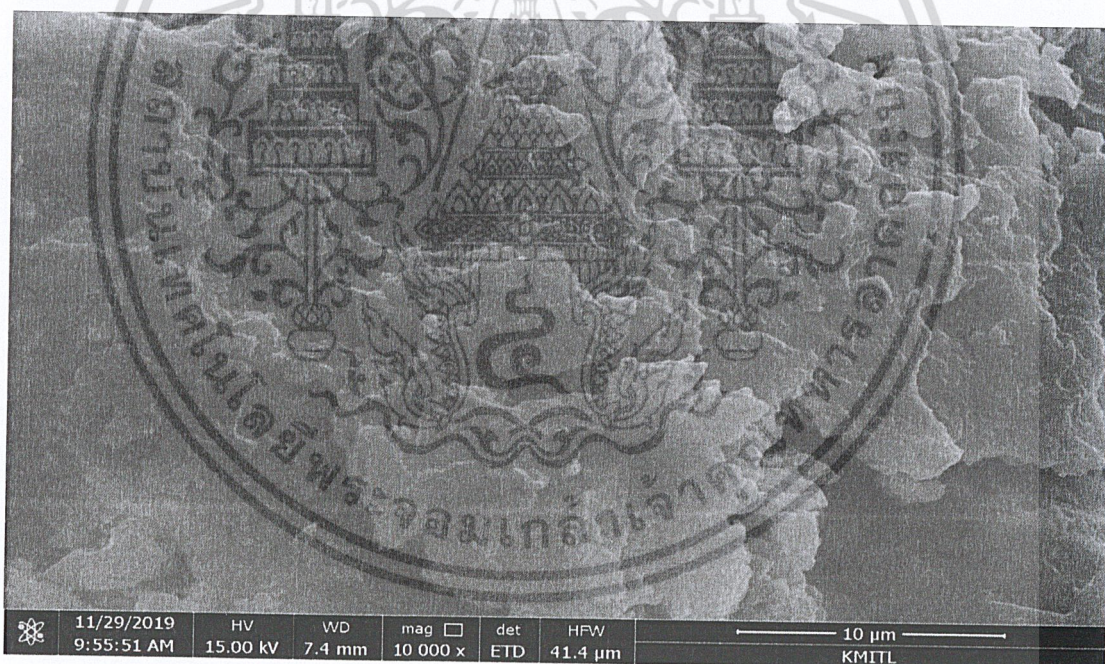
จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสีย พบว่าช่วงการสลายตัวของกากตะกอนน้ำเสียแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของความชื้นหรือน้ำในกากตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนใหญ่ ช่วงที่สองเป็นช่วงของการสลายตัวของสารระเหย (Devolatilization) ตั้งแต่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิประมาณ 580 องศาเซลเซียส และช่วงสุดท้ายตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 570 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป เป็นช่วงของการสลายตัวของคาร์บอนหนัก (Solid decomposition) ซึ่งเป็นการสลายตัวอย่างช้า ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าทางผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองที่อุณหภูมิในช่วงของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลายตัวของกากตะกอนน้ำเสียช่วงที่ 2 เนื่องจากเป็นช่วงที่กากตะกอนน้ำเสียสลายตัวได้สูงที่สุด ดังกราฟที่ได้กล่าวถึงไปข้างต้น [28]

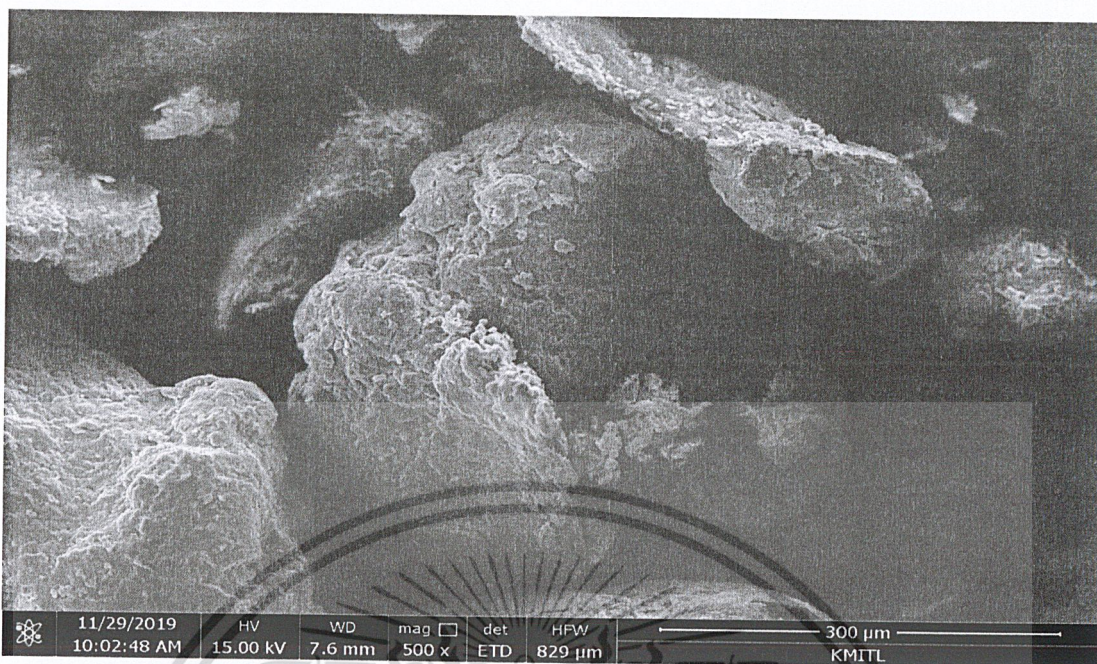
#### 4.1.3 วิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของกากตะกอนน้ำเสียด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของกากตะกอนน้ำเสียก่อนการไพโรไลซิส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 10,000 และ 500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ พบว่ากากตะกอนน้ำเสียมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน มีพื้นผิวภายนอกขรุขระ มีรูพรุนเพียงเล็กน้อย และเมื่อวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบทางเคมี พบว่ากากตะกอนน้ำเสียมีธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งเหมาะสมต่อการนำมาไพโรไลซิสเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ



รูปที่ 4.2 โครงสร้างสัณฐานของกากตะกอนน้ำเสีย ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 โครงสร้างพื้นฐานของกากตะกอนน้ำเสีย ที่กำลังขยาย 500 เท่า

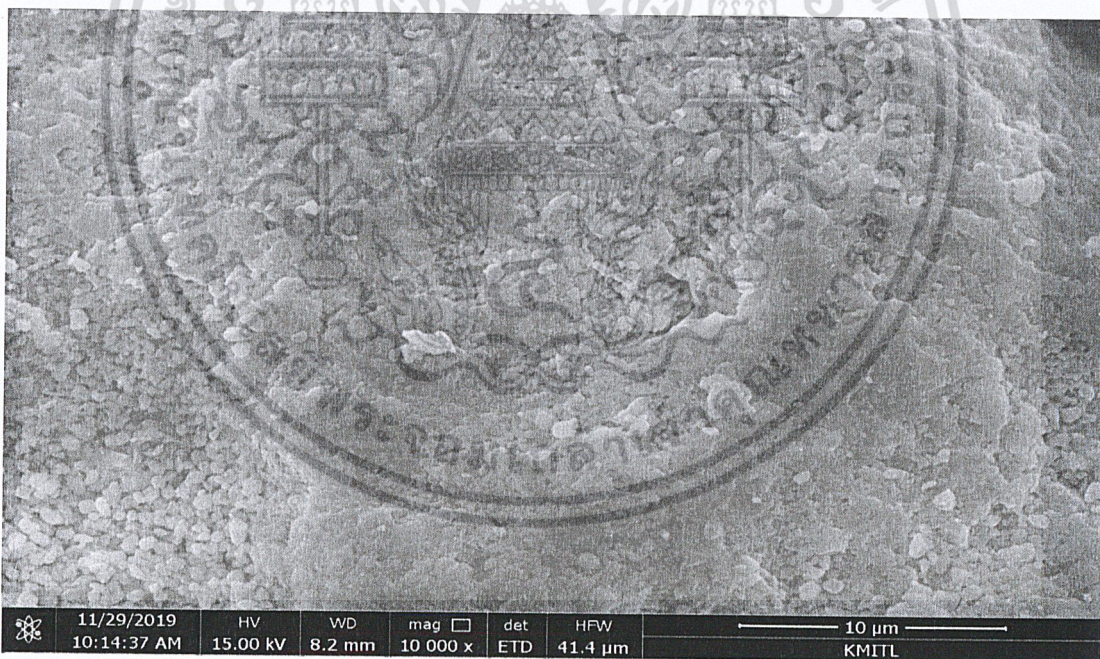
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของกากตะกอนน้ำเสียก่อนกระบวนการไพโรไลซิสด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์

ธาตุองค์ประกอบ	ผลการวิเคราะห์ (wt%)
คาร์บอน (C)	57.08
ออกซิเจน (O)	27.30
โซเดียม (Na)	0.38
แมกนีเซียม (Mg)	0.18
อลูมิเนียม (Al)	6.58
ซิลิกอน (Si)	1.83
ฟอสฟอรัส (P)	0.00
คลอรีน (Cl)	1.04
โพแทสเซียม (K)	0.13
แคลเซียม (Ca)	1.13
ไทเทเนียม (Ti)	0.42
เหล็ก (Fe)	3.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

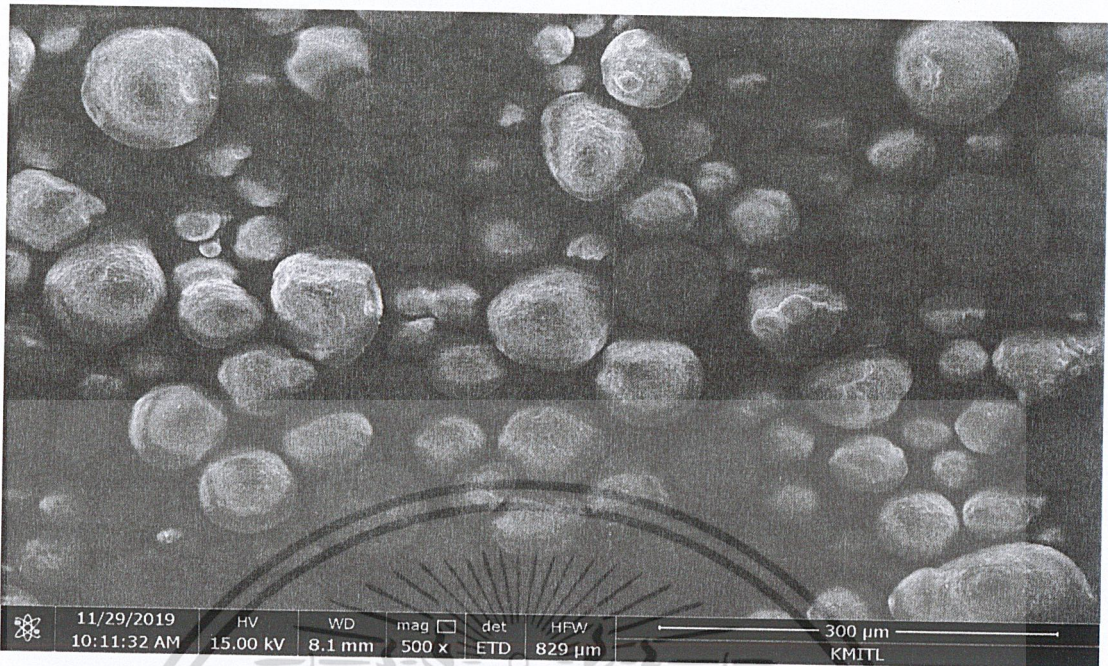
## 4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite)

การโฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 ตามลำดับ พบว่าพื้นที่ผิวมีลักษณะขรุขระ มีความรุปรุนสูง รูปร่างค่อนข้างแน่นอนเป็นลักษณะทรงกลม เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometry: EDS) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ มีธาตุแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ [26] แสดงดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของคาร์บอนแตกกลายเป็นออกไซด์ของโลหะผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอนเนชัน (Decarbonation) และคาร์บอนจะถูกกำจัดออกในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเห็นว่า จะไม่ตรวจพบธาตุคาร์บอน (C) ในการวิเคราะห์



รูปที่ 4.4 โครงสร้างพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 โครงสร้างสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ก่อนกระบวนการไพโรไลซิสด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์

ธาตุองค์ประกอบ	ผลการวิเคราะห์ (wt%)
แคลเซียม (Ca)	25.60
แมกนีเซียม (Mg)	29.02
ออกซิเจน (O)	41.34
ซิลิกอน (Si)	0.59
เหล็ก (Fe)	0.19
อลูมิเนียม (Al)	0.10
อื่นๆ (Other)	3.16

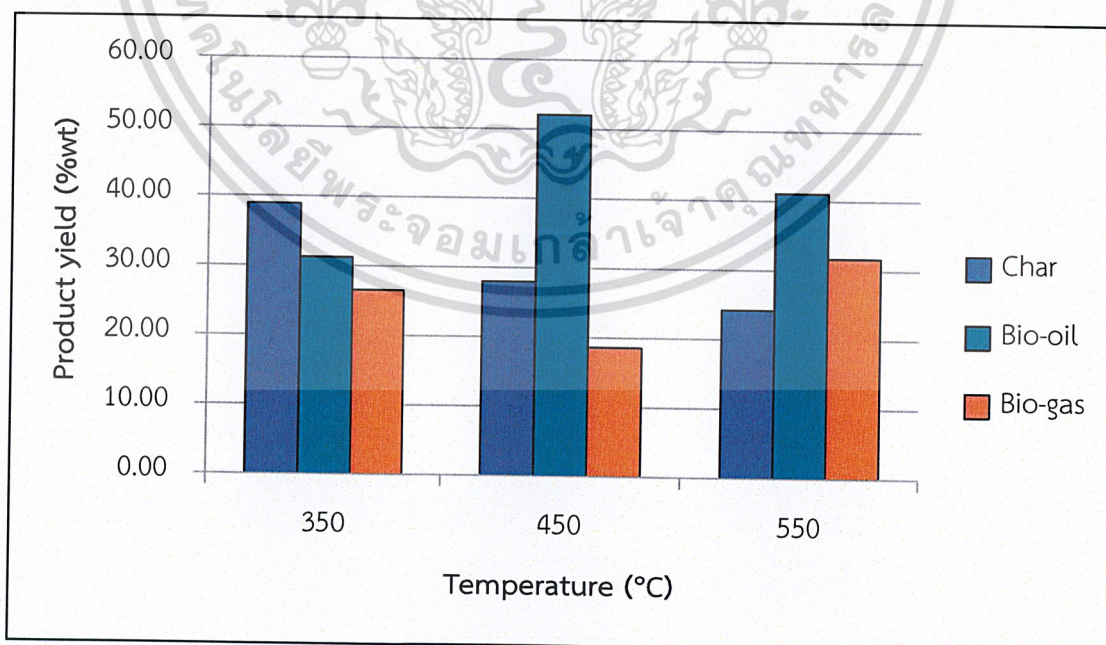
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม

การไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสีย โดยทำการศึกษาตัวแปรต้นของการทดลอง 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิในการไพโรไลซิส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เวลาในการไพโรไลซิส ปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ ที่ส่งผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะ คือ แก๊สชีวภาพ (Bio-gas) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และถ่านชีวภาพ (Char) โดยการทดลองได้ทำการศึกษาที่ละตัวแปรแบบสุ่ม (Univariate) โดยทำซ้ำสองครั้งในแต่ละการทดลอง

#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ผลการทดลองแสดงอุณหภูมิในการไพโรไลซิส ได้แก่ 350 450 และ 550 องศาเซลเซียส โดยขนาดอนุภาคของกากตะกอนน้ำเสียเท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการพาของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) มากที่สุดเท่ากับ 52.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นถ่านชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 38.91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) เท่ากับ 31.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 และ 450 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.6

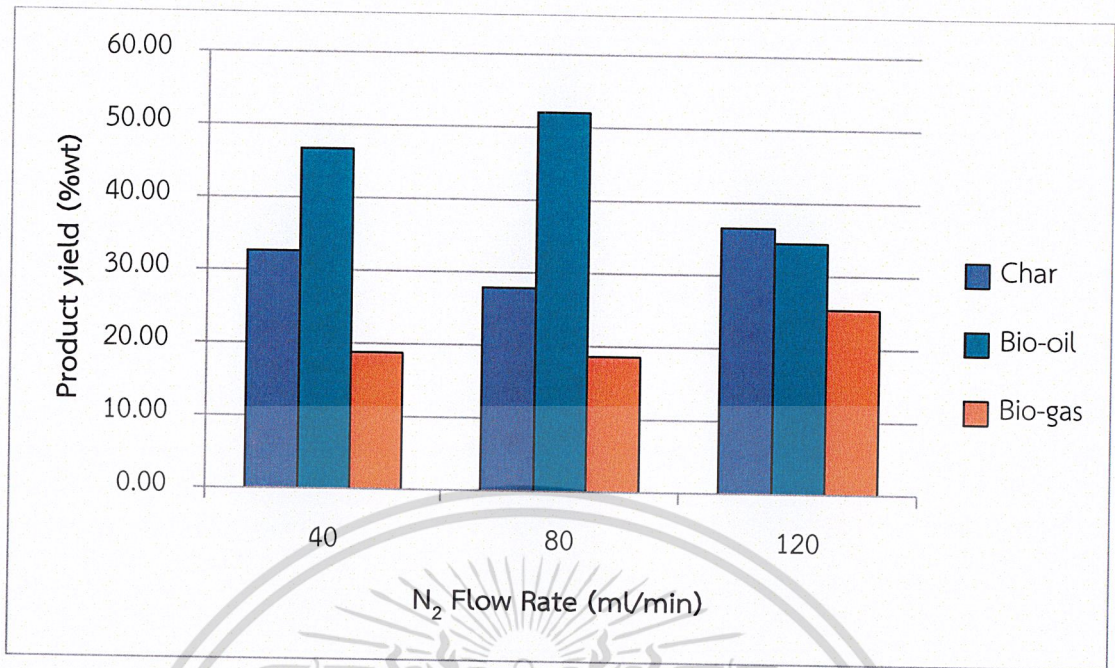


เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 4.6** แสดงผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ผู้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พิจารณาแนวโน้มร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น จะให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นถ่านชีวภาพลดลง เนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของกากตะกอนน้ำเสียด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อพิจารณาร้อยละผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ที่อุณหภูมิเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าร้อยละผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ลดลงจากสภาวะการทดลองที่ใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ในขณะที่ร้อยละผลผลิตที่เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนสูงเกินไป เกิดการสลายตัวทางความร้อนขั้นทุติยภูมิ (Secondary thermal decomposition) ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารระเหยออกเป็นแก๊สที่มีขนาดเล็กลง จึงทำให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นของเหลวลดลงและผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น [35]

#### 4.3.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ผลการทดลองแสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิส ได้แก่ 40 80 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที โดยขนาดอนุภาคของกากตะกอนน้ำเสียเท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) มากที่สุดเท่ากับ 52.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นถ่านชีวภาพ (Char) มากที่สุดเท่ากับ 36.52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) เท่ากับ 25.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.7



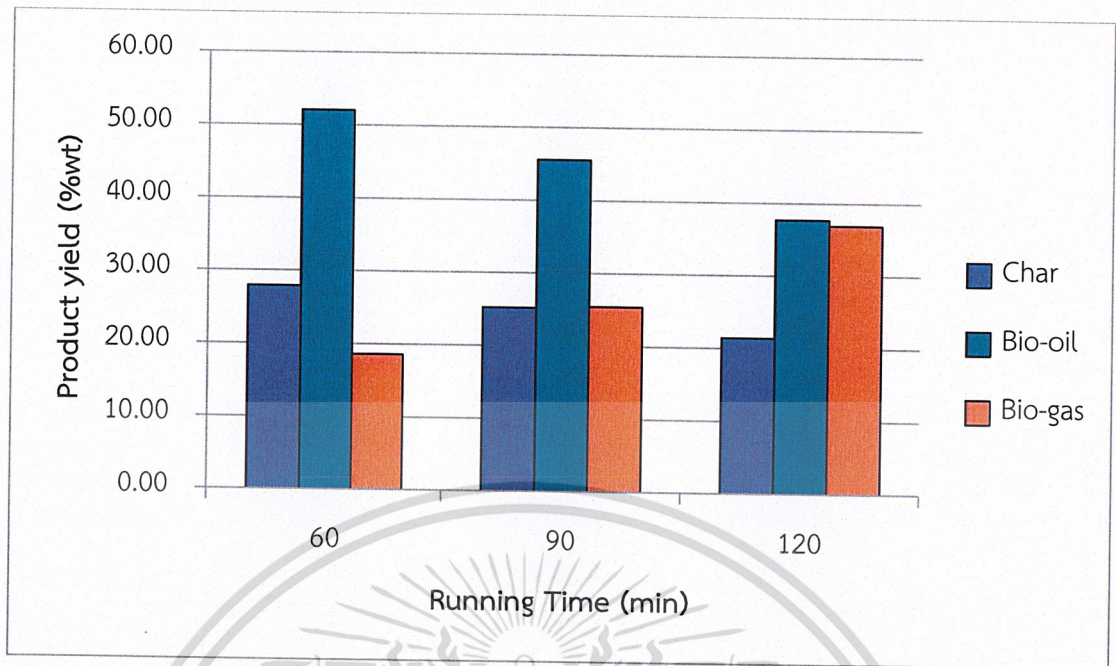
รูปที่ 4.7 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.7 พิจารณาที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 และ 80 มิลลิลิตรต่อ นาที พบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้น ร้อยละผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) สูงขึ้นจาก 46.71 เป็น 52.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนถือเป็นตัวพาแก๊ส (Carrier gas) ช่วยให้อุณหภูมิที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส เข้าสู่เครื่องควบแน่นด้วยความเย็น (Ice trap) ได้เร็วมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อ นาที พบว่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลง เนื่องจากผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนที่มากเกินไป ทำให้ไปพาความร้อนที่ต้องใช้ในการไพโรไลซิสออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วย [36]

#### 4.3.3 ผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ผลการทดลองแสดงเวลาในการไพโรไลซิส ได้แก่ 60 90 และ 120 นาที โดยขนาดอนุภาคของกากตะกอนน้ำเสียเท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ต่อ นาที อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อ นาที ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที ให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) มากที่สุด เท่ากับ 52.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 120 นาที ให้ร้อยละผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพ (Char) น้อยที่สุดเท่ากับ 21.42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และให้ร้อยละผลผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) เท่ากับ 36.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าที่เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 และ 90 นาที แสดงดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



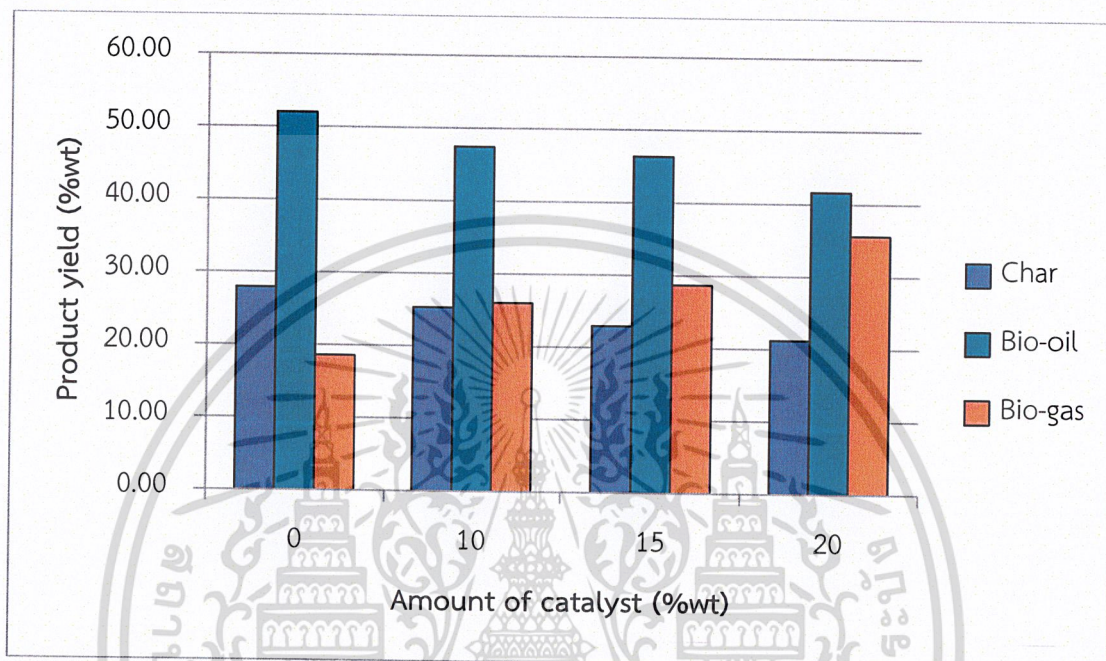
รูปที่ 4.8 แสดงผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.8 พิจารณาแนวโน้มร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ พบว่า แนวโน้มของร้อยละผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และถ่านชีวภาพ (Char) มีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อใช้เวลาในการไพโรไลซิสมากขึ้น ร้อยละผลผลิตที่เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาในการไพโรไลซิสที่มากขึ้นทำให้กากตะกอนน้ำเสียที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์สัมผัสกับความร้อนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามากขึ้น การสลายตัวของของแข็งจึงเกิดมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ผลผลิตที่เป็นถ่านชีวภาพลดลง ที่เวลาในการไพโรไลซิสมากขึ้นทำให้กากตะกอนสัมผัสกับความร้อนมากขึ้น จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจากการศึกษาผลของเวลาในการไพโรไลซิส สรุปได้ว่า เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที จะให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นของเหลวมากที่สุด และที่เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 120 นาที จะให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นของแข็งน้อยที่สุด และร้อยละผลผลิตที่เป็นแก๊สมีแนวโน้มมากขึ้นและมากที่สุดที่เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 120 นาที [29]

#### 4.3.4 ผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ผลการทดลองแสดงปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ในการไพโรไลซิส ได้แก่ 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยขนาดอนุภาคของกากตะกอนน้ำเสียเท่ากับ 500-850 ไมโครเมตร อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 50 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่ออนาที พบว่าเมื่อไม่ได้เติมตัวเร่งปฏิกิริยา จะให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) มากที่สุดเท่ากับ

52.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเพื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้แนวโน้มผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) มากขึ้นและมากที่สุดเท่ากับ 35.62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชีวภาพ (Char) น้อยที่สุด เท่ากับ 21.19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.9



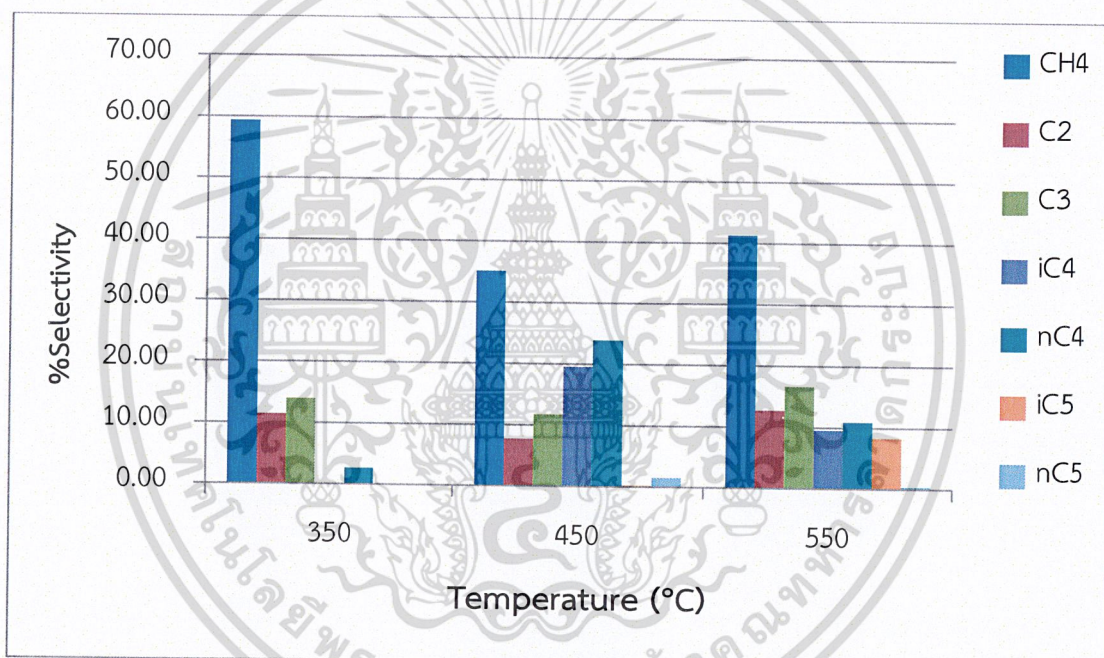
รูปที่ 4.9 แสดงผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ในการไพโรไลซิส ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 พิจารณาแนวโน้มร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) มากขึ้น แนวโน้มผลผลิตที่เป็นของเหลวน้อยลง แต่จะไปเพิ่มผลผลิตที่เป็นแก๊สมากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์จะไปช่วยในการแตกตัว (Cracking) ของสารระเหยในอากาศก่อนน้ำเสียให้แตกตัวได้มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้ผลผลิตที่เป็นของแข็งลดลงด้วย ดังนั้นจากการศึกษาผลของการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดผลผลิตที่มีมูลค่าต่ำ คือ ถ่านชีวภาพ (Char) ให้น้อยลง แต่จะไปช่วยเพิ่มผลผลิตที่มีมูลค่าสูงกว่า คือ แก๊สชีวภาพ (Bio-gas) และน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ลดลงมากขึ้นเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสก็ตาม [37]

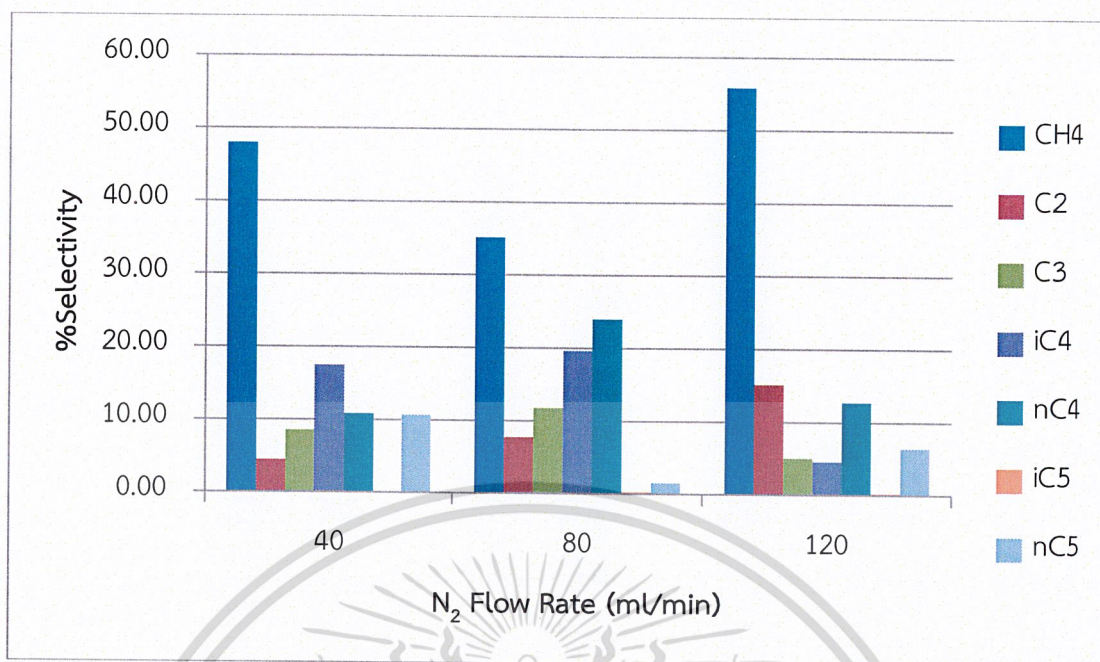
#### 4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม

##### 4.4.1 การเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas)

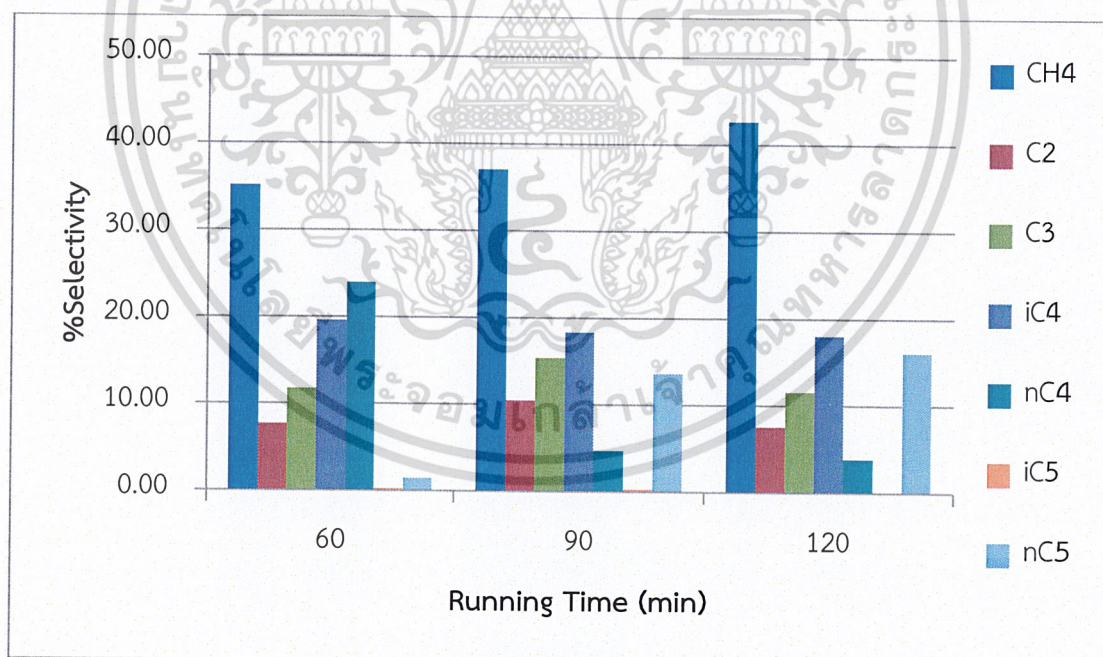
จากระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ โดยทำการวิเคราะห์หาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 5 อะตอม ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (Gas Chromatography – Flame Ionization Detector, GC-FID) สำหรับวิเคราะห์แก๊ส ซึ่งแสดงผลเป็นร้อยละการเลือกเกิด (%Selectivity) แสดงผลดังรูปที่ 4.10 ถึง 4.13



รูปที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas)

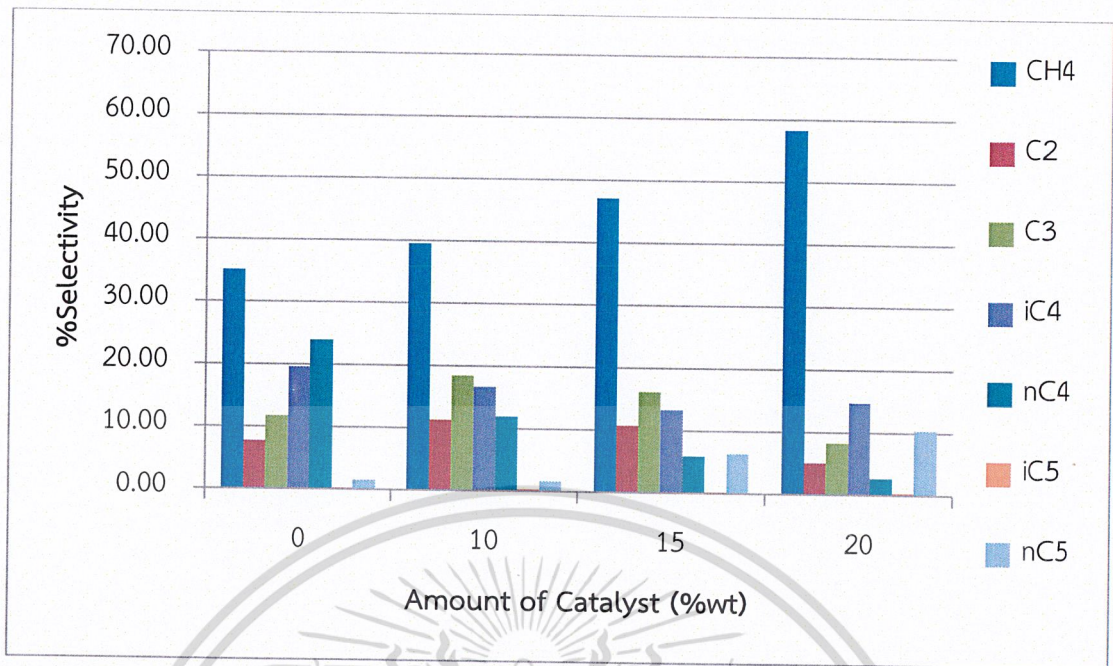


รูปที่ 4.11 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas)



รูปที่ 4.12 แสดงผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Selectivity of Bio-gas)

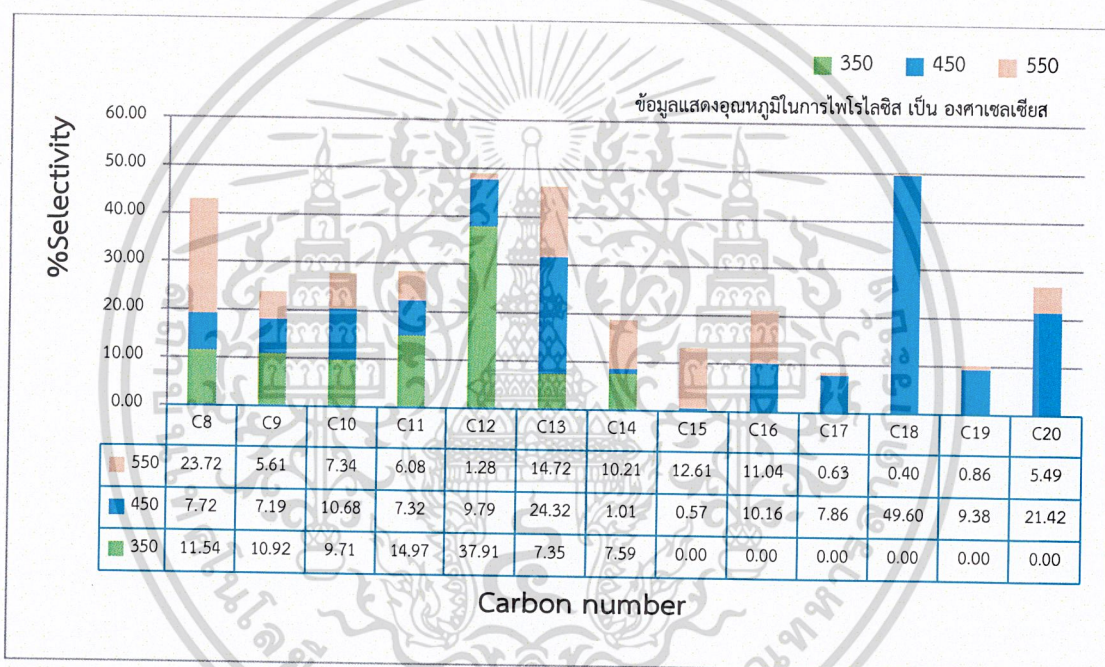
จะเห็นว่าผลจากรูปที่ 4.10 ถึง 4.11 ร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ในแต่ละสภาวะ ให้ปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เป็นส่วนมาก เมื่อพิจารณาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการไพโรไลซิสจากตะกอนน้ำเสีย จะเห็นว่าจากรูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มากขึ้นจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกระจายและหลากหลายมากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิที่มากขึ้นจะช่วยเพิ่มการสลายตัวของกากตะกอนน้ำเสีย ในขณะที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส จะไม่ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนจำนวน 4 และ 5 อะตอม เนื่องจากอุณหภูมิที่ไม่สูงพอทำให้สารระเหยในกากตะกอนน้ำเสียไม่สลายออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ จากรูปที่ 4.11 เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งซึ่งช่วยพาสารระเหยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสออกจากเครื่องปฏิกรณ์ แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงมากขึ้นจะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมีเทนมากขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงเกินไป ทำให้แก๊สไนโตรเจนบางส่วนเกิดการพาความร้อนที่ใช้สำหรับการสลายตัวของกากตะกอนน้ำเสียออกไปด้วย ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนสูงขึ้นได้น้อยลง จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าแนวโน้มของร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) สูงขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสมากขึ้น แต่จะไปลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนสูง เนื่องจากการสลายตัวขั้นทุติยภูมิของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลสูงให้มีขนาดเล็กลง และจากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นชัดว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

เกิดการแตกตัว (Cracking) มากขึ้น ทั้งนี้แก๊สมีเทนถือเป็นแก๊สที่มีประโยชน์มาก สำหรับการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

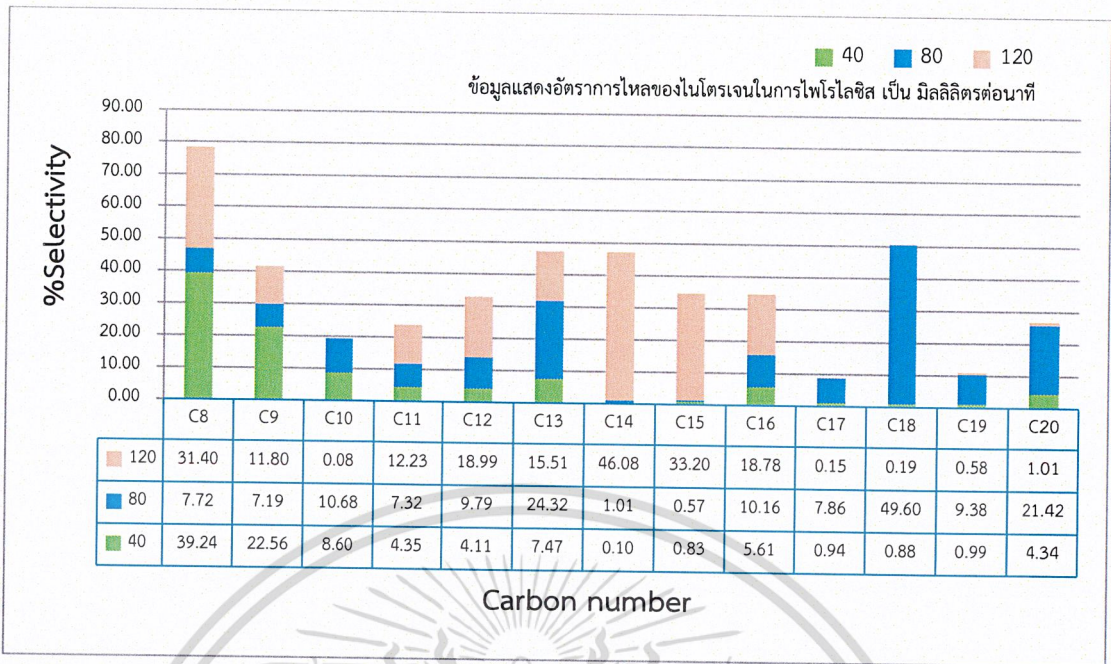
เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงโดยผ่านกระบวนการทางเคมี เช่น การนำไปเผาไหม้โดยสมบูรณ์ เพื่อให้ได้แก๊สสังเคราะห์ต่อไป [38]

#### 4.4.2 การเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil)

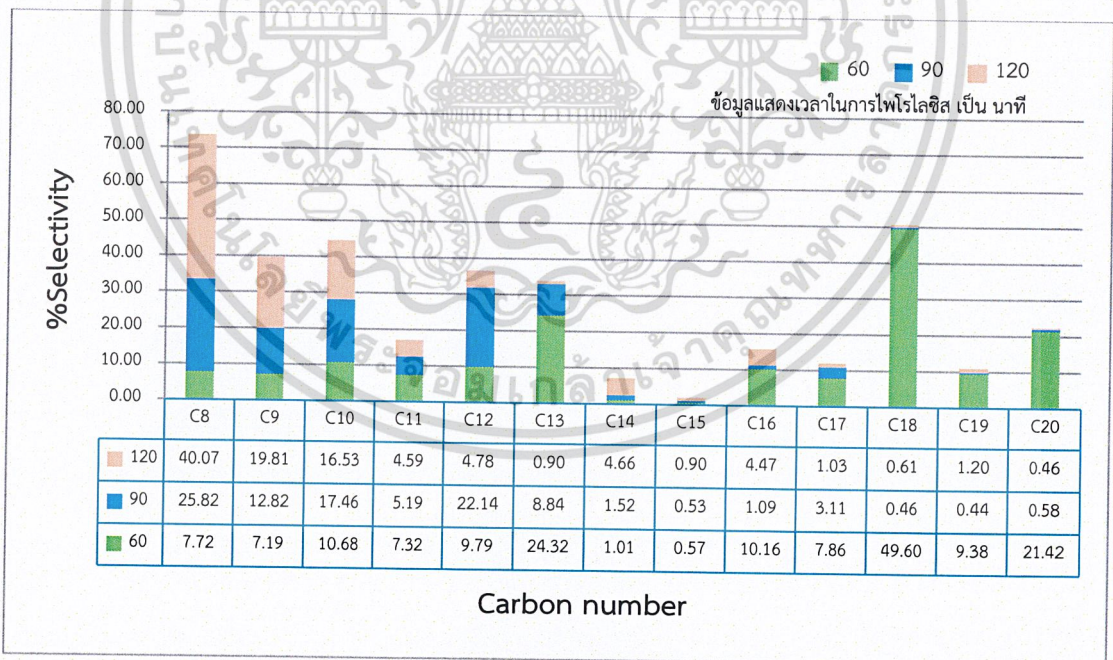
จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) โดยทำการวิเคราะห์หาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (Gas Chromatography – Flame Ionization Detector, GC-FID) สำหรับวิเคราะห์ของเหลว ซึ่งแสดงผลเป็นร้อยละการเลือกเกิด (%Selectivity) ได้ผลดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.17



รูปที่ 4.14 แสดงผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil)

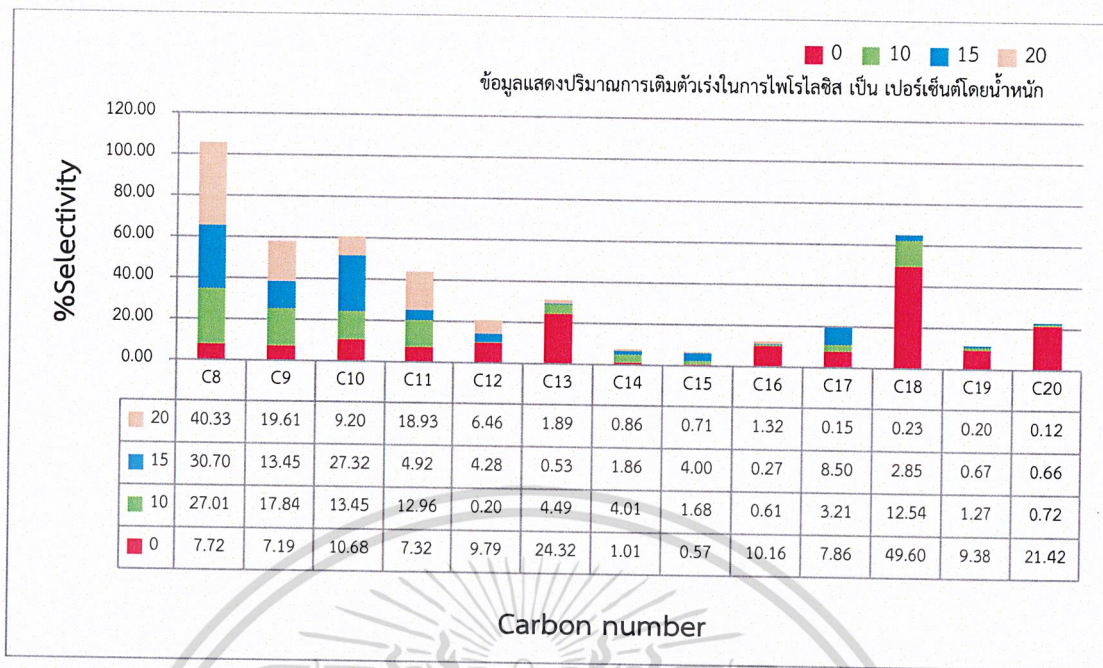


รูปที่ 4.15 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil)



รูปที่ 4.16 แสดงผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงผลของปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ (Selectivity of Bio-oil)

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส พบว่าที่อุณหภูมิเท่ากับ 450 องศาเซลเซียสให้อัตราการเลือกเกิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่กระจายตัวสูง ในขณะที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 อะตอม เนื่องจากความร้อนที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการสลายตัวของไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลสูง ๆ แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงเกินไป ทำให้ไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนจำนวน 17 อะตอมซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำมันดีเซล (Diesel) มีปริมาณลดต่ำลง จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าอัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันดีเซล คืออัตราการไหลของไนโตรเจนเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่ออนาที ในขณะที่อัตราการไหลของไนโตรเจนเท่ากับ 40 และ 120 มิลลิลิตรต่ออนาที จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอม เท่ากับ 8 และ 9 อะตอม ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในน้ำมันเบนซิน จากรูปที่ 4.16 เห็นได้ชัดว่าแนวโน้มของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยคาร์บอนต่ำกว่า 10 อะตอมจะมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการไพโรไลซิสมากขึ้น เนื่องจากสาเหตุการสลายตัวของสารระเหยที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 16 อะตอม มีปริมาณลดลง เนื่องจากผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) ที่ช่วยให้สารระเหยในภาชนะกอน้ำเสียแตกตัว (Cracking) ได้มากขึ้น [19]

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองของโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัทไทยมิทซูสเปเซียลตี้เคมีคอล จำกัด ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) โดยศึกษาอุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 450 และ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสเท่ากับ 40 80 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 90 และ 120 นาที และปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เท่ากับ ร้อยละ 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ที่ส่งผลต่อการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) แก๊สชีวภาพ (Bio-gas) และถ่านชีวภาพ (Char) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสียและตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite)

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสีย พบว่ากากตะกอนน้ำเสีย ประกอบไปด้วย ปริมาณความชื้น (Moisture content) เท่ากับ 1.24 เปอร์เซ็นต์ สารที่สามารถระเหยได้ (Volatiles matter) เท่ากับ 79.67 เปอร์เซ็นต์ ค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) เท่ากับ 4.70 เปอร์เซ็นต์ และขี้เถ้า (Ash) เท่ากับ 14.39 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความร้อน (Heating value) เท่ากับ 5,412.12 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของกากตะกอนน้ำเสียมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน พื้นผิวภายนอกขรุขระ มีรูพรุนเพียงเล็กน้อย และเมื่อวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบทางเคมี พบว่ากากตะกอนน้ำเสียมีธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ พบว่าพื้นที่ผิวมีลักษณะขรุขระ มีความรูพรุนสูง รูปร่างค่อนข้างแน่นอนเป็นลักษณะทรงกลม มีธาตุแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่ากากตะกอนน้ำเสียนี้เหมาะสมในการมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

#### 5.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสีย

จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis/Differential thermal analysis, TGA/DTG)

พบว่า ช่วงที่สองของการวิเคราะห์มีการสลายตัวของกากตะกอนน้ำเสียสูงสุด คือช่วงของการสลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในนามของสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) และสงวนลิขสิทธิ์ไว้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารระเหย (Devolatilization) ตั้งแต่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิประมาณ 580 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงออกแบบการทดลองให้อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสอยู่ภายในช่วงของการสลายตัวจากตะกอนน้ำเสียนี้

### 5.1.3 การศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เวลาและปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่าที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที และไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ให้อัตราผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) มากที่สุดถึง 52.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 120 นาที และปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้อัตราผลผลิตที่เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) มากที่สุด และที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 120 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา จะให้อัตราผลผลิตที่เป็นถ่านชีวภาพ (Char) มากที่สุด

### 5.1.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม

จากการทดลองนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมาทำการวิเคราะห์ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ซึ่งการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) พบว่าส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ในส่วนของสภาวะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) มากที่สุด การเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยคาร์บอน 12-20 อะตอมเป็นส่วนมาก ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในช่วงของน้ำมันดีเซล (Diesel) เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

### 5.1.5 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสีย

จากการทดลองได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น พบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราผลผลิตเพิ่มขึ้น กล่าวคือตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยทำให้กากตะกอนน้ำเสียเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากขึ้น โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สชีวภาพ (Bio-gas) แต่จะลดปริมาณผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) อีกทั้งเมื่อพิจารณาการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มกลุ่มไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยคาร์บอน 8-10 อะตอม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในช่วงของน้ำมันเบนซิน นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ ที่มีปริมาณต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาร้อยละการเลือกเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วงน้ำมันดีเซลเป็นหลัก
2. ควรศึกษาปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนน้ำเสียก่อนเพื่อศึกษาหาวิธีการกำจัดและการป้องกันสารอันตรายต่าง ๆ ก่อนทำการทดลอง
3. การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) ควรติดตั้งชุดควบคุมระบบควบคุม (Control) ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดจากการหาผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่ไม่สามารถควบคุมในเครื่องควบคุมได้ ซึ่งสาเหตุหนึ่งเกิดจากความเย็นไม่เพียงพอต่อการควบคุมแก๊สที่ร้อนให้เป็นของเหลว
4. ในกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียจะเกิดกลิ่นที่แก๊สที่เป็นพิษเกิดขึ้นได้ ต้องมีชุดกรองกลิ่นและแก๊สพิษที่เกิดขึ้น
5. จากข้อจำกัดของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ สามารถบรรจุกากตะกอนน้ำเสียที่จะไพโรไลซิสได้ปริมาณน้อย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเกิดขึ้นในปริมาณน้อย ซึ่งส่งผลให้คำนวณหรือวัดค่าได้ยุ่งยากขึ้น ควรใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ที่สามารถบรรจุกากตะกอนน้ำเสียได้มากขึ้น หรือใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น เช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
6. ควรปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้ เช่น การเติมสารเพิ่มค่าออกเทน ค่าซีเทน สารลดการกัดกร่อนหรือสารปรับค่าความเป็นกรดต่าง เป็นต้น
7. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่สามารถช่วยเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. 2542. พลังงานและทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทย. [Online]. Available : <http://www.eppo.go.th/images/policy/PDF/docs/energyandfuelalternatives.pdf>.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2551. พลังงานทดแทน. [Online]. Available : <https://www.ku.ac.th/e-magazine/jun51/know/know3.htm>.
- [3] กรมควบคุมมลพิษ. 2561. การกำจัดของเสียอุตสาหกรรม. [Online]. Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/haz\\_community.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/haz_community.html).
- [4] วิษณุ มีอยู่ และคณะ. 2548. “โครงการศึกษาและพัฒนากาต้ก๊ากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิง.” คณะเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [5] นรากร ลุนธาดู และมณฑิตา สีหาล้า. 2563. มวลชีวภาพ (Biomass). [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/bioenergynaka/phlangngan-haeng-xnakht/phuch-phlangngan-chnid-him>.
- [6] Bioenergyfields. 2563. การแปรรูปชีวมวล. [Online]. Available : <https://bioenergyfields.org/โรงไฟฟ้าชีวมวล>.
- [7] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. 2563. พลังงานชีวมวล. [Online]. Available : <http://www.eppo.go.th/images/Power/renewable-energy/14.pdf>.
- [8] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2561. ระบบบำบัดน้ำเสีย. [Online]. Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/water/wt.html#s7](http://www.pcd.go.th/info_serv/water/wt.html#s7).
- [9] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. เชื้อเพลิงชีวภาพคืออะไร. [Online]. Available : <https://www.scimath.org/article-chemistry/item/1321-what-is-biofuel>.
- [10] Physics. 2563. กระบวนการผลิตไฟโรไลซิส. [Online]. Available : [http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=453](http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=453).
- [11] เบญจพร เครือทะนันทไชย. 2557. “การวิเคราะห์พารามิเตอร์และต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้า.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต วิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] จักรพล โปธิประสิทธิ์. 2547. “การแยกสลายกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ด้วยความร้อน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [13] ชนิดา มฤคหัต. 2550. “การแปรสภาพกากสบู่อุปโภคบริโภคโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นเบตหนึ่ง.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14] ทิพย์นภา วงศ์สาลี และนลินี ชัยมงคล. 2545. “รายงานปัญหาพิเศษ” วิทยาศาสตรบัณฑิต เคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [15] นฤมล ชูบัวทอง. 2550. “ผลขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลต่อไพโรไลซิสและการเผาไหม้.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [16] กุลนันทน์ วีรณรงค์กร และอมรชัย อารณวิธานพ. 2557. ไพโรไลซิส (Pyrolysis). [Online]. Available : [http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn241\\_p61-64.pdf](http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn241_p61-64.pdf).
- [17] ณัฐนิชา พูวาภิรมย์. 2560. “การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอออยล์จากกากตะกอนน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผ่านกระบวนการไพโรไลซิส.” สหกิจศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
- [18] ธารพงษ์ วิจิตรานต์. 2559. เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล. [Online]. Available : [http://www.iscisaraburee.sc.chula.ac.th/2017/index.php/portfolio/about\\_us/](http://www.iscisaraburee.sc.chula.ac.th/2017/index.php/portfolio/about_us/).
- [19] ฐานันดร ประกอบ. 2561. “การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไพโรไลซิสของ *Ceratophyllum demersum* L. โดยใช้โดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [20] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2563. Fast Pyrolysis. [Online]. Available : [https://www.dede.go.th/ewt\\_dl\\_link.php?nid=44060](https://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=44060).
- [21] หาญณรงค์ ชิตเจริญอยู่. 2561. “ผลของการไหลแบบพัลส์ต่ออุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาเคมีไนโรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับการแตกตัวของไอน้ำมัน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตรพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [22] Mustafa K. Hossain, Vladimir Strezov, K. Yin Chan, Artur Ziolkowski, Peter F. Nelson. 2011. “Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar.” *Journal of Environmental Management*. 92(1) : 223-228.

- [23] อติศักดิ์ ปัตติยะ. 2553. “ผลของการลดแร่ธาตุของชีวมวลที่มีต่อผลได้และคุณสมบัติของไบโอออยล์ที่ผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว.” คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [24] นีรา วงศ์ทยานวัตร และมาลี สันติคุณารณ. 2560. “การสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยกระบวนการไพโรไลซิส.” ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [25] สุทัศน์ ยกส้าน. 2560. **ตัวเร่งปฏิกิริยา**. [Online]. Available : <https://mgronline.com/science/detail/9600000109918>.
- [26] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2562. **โดโลไมต์**. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/โดโลไมต์>.
- [27] ObidTursunov. 2014. “A comparison of catalysts zeolite and calcined dolomite for gas production from pyrolysis of municipal solid waste (MSW).” *Ecological Engineering*. 69 : 237-243.
- [28] K.Chaiwong, T.Kiatsiroat, N.Vorayos, C.Thararax. 2013. “Study of bio-oil and bio-char production from algae by slow pyrolysis.” *Biomass and Bioenergy*. 56 : 600-606.
- [29] Mohammad Nurul Islam, Mohammad Uzzal Hossain Joardder, SM Nazmul Hoque, Md. ShazibUddin. 2013. “A Comparative Study on Pyrolysis for Liquid Oil from Different Biomass Solid Wastes.” *Procedia Engineering*. 56 : 643-649.
- [30] L.A.C.Tarelho, T. Hauschild, A.C.M. Vilas-Boas, D.F.R. Silva, M.A.A. Matos. 2019. “Biochar from pyrolysis of biological sludge from wastewater treatment” *Energy Reports*. 6 : 216-222.
- [31] M.U. Garba, Umaru Musa, A.G. OlugbengaYahaya S. Mohammad, Mohammed Yahaya, A.A. Ibrahim. 2018. “Catalytic upgrading of bio-oil from bagasse: Thermogravimetric analysis and fixed bed pyrolysis.” *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. 7(4) : 776-781.
- [32] Chowdhury Zaira Zaman. 2017. **Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste**. [Online]. Available : <https://www.intechopen.com/books/pyrolysis/pyrolysis-a-sustainable-way-to-generate-energy-from-waste>.
- [33] Conesa, J.A. and A. Domene. 2015. “Gasification and pyrolysis of *Posidonia oceanica* in the presence of dolomite.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 113 : 680-689.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] Cheng Qian, Qingbo Li, Zezhong Zhang, Xiaofeng Wang, Jiaochan Hua, Wenjun Caob. 2020. "Prediction of higher heating values of biochar from proximate and ultimate analysis." *Fuel*. 265 : 116.
- [35] Franco Cataldo. 2015. "Thermal stability, decomposition enthalpy, and Raman spectroscopy of 1-alkene secondary ozonides." *Tetrahedron Letters*. 56 : 994-998.
- [36] Jin H. 2014. "Leaching of heavy metals from fast pyrolysis residues produced from different particle sizes of sewage sludge." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 109 : 168-175.
- [37] Pütün E. 2010. "Catalytic pyrolysis of biomass: Effects of pyrolysis temperature, sweeping gas flow rate and MgO catalyst." *Energy*. 35(7) : 2761-2766.
- [38] Cui Quan, Ningbo Gao, Qingbin Song. 2016. "Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor : Thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 121 : 84-92.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ข้อมูลแสดงค่าร้อยละผลผลิต (%Yield) ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน  
น้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัทไทยมิตซูซุสเปเชียลตีเคมีคอล จำกัด

### 1. ข้อมูลแสดงผลจากการทดลอง

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการ  
ไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่	น้ำหนักกาก ตะกอนน้ำเสีย (g)	น้ำหนักทราย ควอตซ์ (g)	น้ำหนักของแข็ง ที่ได้ (g)	น้ำหนักน้ำมัน ชีวภาพ (g)
350	1	1.0098	0.5102	1.9287	0.3215
	2	1.0002	0.5004	1.8993	0.3221
	3	1.1012	0.5002	2.0021	0.3254
450	1	1.002	0.5075	1.7977	0.5296
	2	1.0432	0.5125	1.8322	0.5221
	3	1.0023	0.505	1.7918	0.5328
550	1	0.999	0.5054	1.7466	0.4209
	2	1.0028	0.5044	1.7621	0.4195
	3	1.0999	0.5043	1.8558	0.4303

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

อัตราการไหลของN <sub>2</sub> (ml/min)	ครั้งที่	น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย (g)	น้ำหนักทรายควอตซ์ (g)	น้ำหนักของแข็งที่ได้ (g)	น้ำหนักน้ำมันชีวภาพ (g)
40	1	1.0544	0.5544	1.9371	0.4711
	2	1.0052	0.5211	1.8602	0.4689
	3	1.0004	0.5004	1.8364	0.4881
80	1	1.002	0.5075	1.7977	0.5296
	2	1.0432	0.5125	1.8322	0.5221
	3	1.0023	0.505	1.7918	0.5328
120	1	0.998	0.5113	1.8985	0.3806
	2	1.0998	0.5111	1.9882	0.3212
	3	1.0203	0.5001	1.8902	0.3684

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

เวลา (min)	ครั้งที่	น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย (g)	น้ำหนักทรายควอตซ์ (g)	น้ำหนักของแข็งที่ได้ (g)	น้ำหนักน้ำมันชีวภาพ (g)
60	1	1.002	0.5075	1.7977	0.5296
	2	1.0432	0.5125	1.8322	0.5221
	3	1.0023	0.505	1.7918	0.5328
90	1	1.011	0.5028	1.7693	0.4924
	2	1.0131	0.5022	1.7803	0.4897
	3	1.1002	0.5102	1.8763	0.4362
120	1	1.006	0.5152	1.7414	0.3923
	2	1.1006	0.5034	1.8272	0.3847
	3	1.0238	0.5003	1.7502	0.4001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 แสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	ครั้งที่	น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย (g)	น้ำหนักทรายควอตซ์ (g)	น้ำหนักของแข็งที่ได้ (g)	น้ำหนักน้ำมันชีวภาพ (g)
10	1	1.0042	0.5074	1.8692	0.4869
	2	1.0222	0.5232	1.8993	0.4623
	3	1.0119	0.5001	1.8725	0.4923
15	1	1.0467	0.5054	1.9362	0.4674
	2	1.0112	0.5004	1.8993	0.4595
	3	1.0047	0.5062	1.8949	0.4923
20	1	1.0343	0.5089	1.9594	0.4223
	2	1.0022	0.5081	1.9327	0.4113
	3	1.0115	0.5011	1.9326	0.4351

## 2. การคำนวณร้อยละผลผลิต (%Yield)

### 2.1 สูตรร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพ เท่ากับ

$$\frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่ได้} - (\text{น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย} + \text{น้ำหนักทรายควอตซ์})}{\text{น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย}} \times 100$$

### 2.2 สูตรร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ เท่ากับ

$$\frac{\text{น้ำหนักของน้ำมันชีวภาพที่ได้}}{\text{น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย}} \times 100$$

### 2.3 สูตรร้อยละผลผลิตของแก๊สชีวภาพ เท่ากับ

$$100 - [(\text{ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ}) + (\text{ร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพ})]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวอย่างการคำนวณ

จากข้อมูลตาราง ก.1 ที่การทดลองครั้งที่ 1 เมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส พบว่ามีข้อมูลดังนี้

น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย เท่ากับ	1.0098 กรัม
น้ำหนักของแข็งที่ได้ เท่ากับ	1.9287 กรัม
น้ำหนักทรายควอตซ์ เท่ากับ	0.5102 กรัม
น้ำหนักน้ำมันชีวภาพ เท่ากับ	0.3215 กรัม

$$\text{จากสูตร 2.1 ร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพ} = \frac{1.9287 - (1.0098 + 0.5102)}{1.0098} \times 100$$

ดังนั้น ร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพ เท่ากับ 40.47 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

$$\text{จากสูตร 2.2 ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ} = \frac{0.3215}{1.0098} \times 100$$

ดังนั้น ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ เท่ากับ 31.84 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

$$\text{จากสูตร 2.3 ร้อยละผลผลิตของแก๊สชีวภาพ} = 100 - (31.84 + 40.47)$$

ดังนั้น ร้อยละผลผลิตของแก๊สชีวภาพ เท่ากับ 26.72 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ก.5 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการ  
ไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่	ร้อยละผลผลิตที่ได้ (%wt)		
		น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชีวภาพ	แก๊สชีวภาพ
350	1	31.84	40.47	26.72
	2	32.20	39.86	27.91
	3	29.55	36.39	24.87
	ค่าเฉลี่ย	31.20	38.91	26.50
450	1	52.85	28.76	18.18
	2	50.05	26.50	19.31
	3	53.16	28.38	18.23
	ค่าเฉลี่ย	52.02	27.88	18.57
550	1	42.13	24.24	33.72
	2	41.83	25.42	32.47
	3	39.12	22.87	28.92
	ค่าเฉลี่ย	41.03	24.18	31.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของ  
แก๊สไนโตรเจนในการไฟโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

อัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจน (ml/min)	ครั้งที่	ร้อยละผลผลิตที่ได้ (%wt)		
		น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชีวภาพ	แก๊สชีวภาพ
40	1	44.68	31.14	19.03
	2	46.65	33.22	19.62
	3	48.79	33.55	17.62
	ค่าเฉลี่ย	46.71	32.63	18.76
80	1	52.85	28.76	18.18
	2	50.05	26.50	19.31
	3	53.16	28.38	18.23
	ค่าเฉลี่ย	52.02	27.88	18.57
120	1	38.14	39.00	23.07
	2	29.21	34.31	27.41
	3	36.11	36.24	25.66
	ค่าเฉลี่ย	34.48	36.52	25.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิส  
กากตะกอนน้ำเสีย

เวลา (min)	ครั้งที่	ร้อยละผลผลิตที่ได้ (wt%)		
		น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชีวภาพ	แก๊สชีวภาพ
60	1	52.85	28.76	18.18
	2	50.05	26.50	19.31
	3	53.16	28.38	18.23
	ค่าเฉลี่ย	52.02	27.88	18.57
90	1	48.70	25.27	24.94
	2	48.34	26.16	24.21
	3	39.65	24.17	27.08
	ค่าเฉลี่ย	45.56	25.20	25.41
120	1	39.00	21.89	38.52
	2	34.95	20.28	35.63
	3	39.08	22.08	36.51
	ค่าเฉลี่ย	37.68	21.42	36.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละผลผลิตโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	ครั้งที่	ร้อยละผลผลิตที่ได้ (wt%)		
		น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชีวภาพ	แก๊สชีวภาพ
10	1	48.49	25.63	25.46
	2	45.23	24.78	27.82
	3	48.65	25.48	24.70
	ค่าเฉลี่ย	47.45	25.30	25.99
15	1	44.65	22.29	28.59
	2	45.44	23.39	30.06
	3	49.00	23.18	27.35
	ค่าเฉลี่ย	46.37	22.95	28.67
20	1	40.83	20.60	35.25
	2	41.04	22.11	36.63
	3	43.02	20.87	34.98
	ค่าเฉลี่ย	41.63	21.19	35.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิด (%Selectivity) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระบวนการไพโรไลซิส

#### 1. ข้อมูลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของแก๊สชีวภาพ

##### 1.1 ข้อมูลแสดงพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สชีวภาพ (Bio-gas)

ตารางที่ ข.1 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นแก๊สชีวภาพสำหรับการทดลองครั้งที่ 1

ปัจจัย ที่ ศึกษา	สภาวะ ที่ ทดลอง	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)							
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>	Total
A	350	45218	12856	11562	222	3254	0	0	73112
	450	361542	76460	99225	221958	251052	2158	12609	1025004
	550	594033	251567	393036	595321	830354	896750	29483	3590544
B	40	1344250	181866	314739	539563	396169	2940	255444	3034971
	80	361542	76460	99225	221958	251052	2158	12609	1025004
	120	342659	95672	33211	38768	91380	1544	40670	643904
C	60	361542	76460	99225	221958	251052	2158	12609	1025004
	90	342659	95672	33211	38768	91380	1544	40670	643904
	120	720679	107206	155558	313761	60235	1865	264233	1623537
D	10	2235194	561821	844411	1049761	563062	19890	101152	5375291
	15	1340973	287390	422980	436511	152380	4685	115445	2760364
	20	4267444	354450	597480	1448451	200094	28213	817280	7713412

หมายเหตุ : ปัจจัย A แสดงอุณหภูมิในการไพโรไลซิส (องศาเซลเซียส)

ปัจจัย B แสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)

ปัจจัย C แสดงเวลาในการไพโรไลซิส (นาที)

ปัจจัย D แสดงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นแก๊สชีวภาพสำหรับการทดลองครั้งที่ 2

ปัจจัย ที่ ศึกษา	สภาวะ ที่ ทดลอง	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)							
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>	Total
A	350	45218	12856	11562	222	3254	0	0	73112
	450	361542	76460	99225	221958	251052	2158	12609	1025004
	550	594033	251567	393036	595321	830354	896750	29483	3590544
B	40	1344250	181866	314739	539563	396169	2940	255444	3034971
	80	361542	76460	99225	221958	251052	2158	12609	1025004
	120	342659	95672	33211	38768	91380	1544	40670	643904
C	60	361542	76460	99225	221958	251052	2158	12609	1025004
	90	342659	95672	33211	38768	91380	1544	40670	643904
	120	720679	107206	155558	313761	60235	1865	264233	1623537
D	10	2235194	561821	844411	1049761	563062	19890	101152	5375291
	15	1340973	287390	422980	436511	152380	4685	115445	2760364
	20	4267444	354450	597480	1448451	200094	28213	817280	7713412

หมายเหตุ : ปัจจัย A แสดงอุณหภูมิในการไพโรไลซิส (องศาเซลเซียส)

ปัจจัย B แสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มีลลิตรต่อนาที)

ปัจจัย C แสดงเวลาในการไพโรไลซิส (นาที)

ปัจจัย D แสดงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)

ตารางที่ ข.3 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นแก๊สชีวภาพสำหรับการทดลองครั้งที่ 3

ปัจจัย ที่ ศึกษา	สภาวะ ที่ ทดลอง	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)							
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>	Total
A	350	39296	10822	13903	0	2289	0	0	66310
	450	1162405	366977	557053	561517	521256	15643	84188	3269039
	550	589430	200453	245518	134654	100086	5432	32422	1307995
B	40	1344034	87394	181338	445081	231770	2974	304990	2597581
	80	1162405	366977	557053	561517	521256	15643	84188	3269039
	120	448037	57807	43223	30955	90395	903	37008	708328
C	60	1162405	366977	557053	561517	521256	15643	84188	3269039
	90	1385623	458212	658420	891453	166932	12269	499985	4072894
	120	695001	125450	210362	254854	54423	2006	236521	1578617
D	10	2225648	435989	895401	876349	596220	25846	78456	5133909
	15	1258411	298740	455645	365242	165881	8456	192201	2744576
	20	3865690	350354	580444	903926	185481	19738	534137	6439770

หมายเหตุ : ปัจจัย A แสดงอุณหภูมิในการไพโรไลซิส (องศาเซลเซียส)

ปัจจัย B แสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)

ปัจจัย C แสดงเวลาในการไพโรไลซิส (นาที)

ปัจจัย D แสดงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส (Bio-gas)

### สูตรการคำนวณ

$$\frac{\text{ร้อยละการเลือกเกิดของสารที่คาร์บอนได อ็อกไซด์}}{\text{คาร์บอนได อ็อกไซด์}} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนได อ็อกไซด์}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมของแก๊สชีวภาพ}} \times 100$$

### ตัวอย่างการคำนวณ

จากตารางที่ ข.1 พบว่าที่สภาวะการทดลองครั้งที่ 1 อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) เท่ากับ 45218 และพื้นที่ใต้กราฟรวมของแก๊สชีวภาพ เท่ากับ 73112

### จากสูตร

$$\begin{aligned} \frac{\text{ร้อยละการเลือกเกิดของแก๊สมีเทน (CH}_4\text{)}}{\text{มีเทน (CH}_4\text{)}} &= \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของแก๊สมีเทน}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมของแก๊สชีวภาพ}} \times 100 \\ &= \frac{45218}{73112} \times 100 \end{aligned}$$

ดังนั้น ร้อยละการเลือกเกิดของแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) เท่ากับ 61.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของแก๊ส  
ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส

อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)						
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>
350	1	61.85	0.18	0.16	0	0.04	0	0
	2	57.01	17.83	20.67	0	4.49	0	0
	3	59.26	16.32	20.97	0	3.45	0	0
	ค่าเฉลี่ย	59.37	11.44	13.93	0	2.66	0	0
450	1	35.27	7.46	9.68	21.65	24.49	0.21	1.23
	2	34.62	4.48	8.53	20.03	31.45	0.1	0.8
	3	35.56	11.23	17.04	17.18	15.95	0.48	2.58
	ค่าเฉลี่ย	35.15	7.72	11.75	19.62	23.96	0.26	1.53
550	1	16.54	7.01	10.95	16.58	23.13	24.98	0.82
	2	50.34	11.95	15.46	12.21	9.56	0.05	0.43
	3	45.06	15.33	18.77	10.29	7.65	0.42	2.48
	ค่าเฉลี่ย	37.32	11.43	15.06	13.03	13.45	8.48	1.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของแก๊ส  
ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิส

อัตราการไหลของ N <sub>2</sub> (mL/min)	ครั้งที่	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)						
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>
40	1	44.29	5.99	10.37	17.78	13.05	0.1	8.42
	2	47.86	3.95	8.16	17.54	10.54	0.12	11.82
	3	51.74	3.36	6.98	17.13	8.92	0.11	11.74
	ค่าเฉลี่ย	47.96	4.44	8.5	17.48	10.84	0.11	10.66
80	1	35.27	7.46	9.68	21.65	24.49	0.21	1.23
	2	34.62	4.48	8.53	20.03	31.45	0.1	0.8
	3	35.56	11.23	17.04	17.18	15.95	0.48	2.58
	ค่าเฉลี่ย	35.15	7.72	11.75	19.62	23.96	0.26	1.53
120	1	53.22	14.86	5.16	6.02	14.19	0.24	6.32
	2	51.09	22.36	3.82	3.46	11.16	0.3	7.81
	3	63.25	8.16	6.1	4.37	12.76	0.13	5.22
	ค่าเฉลี่ย	55.85	15.13	5.03	4.62	12.71	0.22	6.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของแก๊ส  
ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิส

เวลา (min)	ครั้งที่	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)						
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>
60	1	35.27	7.46	9.68	21.65	24.49	0.21	1.23
	2	34.62	4.48	8.53	20.03	31.45	0.1	0.8
	3	35.56	11.23	17.04	17.18	15.95	0.48	2.58
	ค่าเฉลี่ย	35.15	7.72	11.75	19.62	23.96	0.26	1.53
90	1	38.25	10.33	15.25	16.18	6.74	0.32	12.93
	2	38.86	9.87	14.74	17.03	3.4	0.39	15.7
	3	34.02	11.25	16.17	21.89	4.1	0.3	12.28
	ค่าเฉลี่ย	37.04	10.48	15.39	18.36	4.75	0.34	13.64
120	1	44.39	6.6	9.58	19.33	3.71	0.11	16.28
	2	39.45	8.18	11.86	18.74	4.56	0.13	17.08
	3	44.03	7.95	13.33	16.14	3.45	0.13	14.98
	ค่าเฉลี่ย	42.62	7.58	11.59	18.07	3.91	0.12	16.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของแก๊ส  
ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส

ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt)	ครั้งที่	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)						
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	i-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub>	i-C <sub>5</sub>	n-C <sub>5</sub>
10	1	41.58	10.45	15.71	19.53	10.48	0.37	1.88
	2	33.66	15.14	22.16	13.52	13.72	0.29	1.52
	3	43.35	8.49	17.44	17.07	11.61	0.50	1.53
	ค่าเฉลี่ย	39.53	11.36	18.44	16.71	11.94	0.39	1.64
15	1	48.58	10.41	15.32	15.81	5.52	0.17	4.18
	2	46.95	11.00	16.58	10.95	6.28	0.28	7.95
	3	45.85	10.88	16.6	13.31	6.04	0.31	7.00
	ค่าเฉลี่ย	47.13	10.77	16.17	13.36	5.95	0.25	6.38
20	1	55.32	4.6	7.75	18.78	2.59	0.37	10.60
	2	59.60	5.19	8.2	11.53	2.60	0.48	12.40
	3	60.03	5.44	9.01	14.04	2.88	0.31	8.29
	ค่าเฉลี่ย	58.32	5.07	8.32	14.78	2.69	0.38	10.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ข้อมูลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ

### 2.1 ข้อมูลแสดงพื้นที่ใต้กราฟของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil)

ตารางที่ ข.8 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพโดยค่านึงปัจจัยของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak )								
	อุณหภูมิ (°C)								
	350			450			550		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C <sub>8</sub>	38430	40054	37934	25224	30057	26974	124329	128343	125439
C <sub>9</sub>	34502	36944	38942	24332	25934	26349	28766	29809	30871
C <sub>10</sub>	34332	31589	31920	39845	32998	40908	38965	39654	38451
C <sub>11</sub>	43223	49114	59302	23432	25879	28734	32428	31890	32544
C <sub>12</sub>	123902	129383	129438	34322	35189	34733	6745	6896	6742
C <sub>13</sub>	23321	26945	23998	85362	84337	89342	78564	77435	78554
C <sub>14</sub>	23312	27834	25564	3429	3672	3694	54534	53896	54232
C <sub>15</sub>	0	0	0	2046	2003	1990	66754	67543	66779
C <sub>16</sub>	0	0	0	34421	35443	38402	58096	59856	58098
C <sub>17</sub>	0	0	0	23956	29834	30042	3435	3321	3276
C <sub>18</sub>	0	0	0	175343	174563	178344	2008	2165	2273
C <sub>19</sub>	0	0	0	33223	33220	33392	4606	4536	4632
C <sub>20</sub>	0	0	0	74382	75352	78453	29483	28651	29342
Total	321022	341863	347098	346800	354087	364317	528713	533995	531233

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิส

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak )								
	อัตราการไหลของ N <sub>2</sub> (mL/min)								
	40			80			120		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C <sub>8</sub>	210453	223452	225671	25224	30057	26974	90849	91234	92313
C <sub>9</sub>	128702	124538	125789	24332	25934	26349	33232	34006	35602
C <sub>10</sub>	48534	47691	48210	39845	32998	40908	234	242	258
C <sub>11</sub>	23298	24312	25478	23432	25879	28734	34268	35674	36598
C <sub>12</sub>	23056	22073	23890	34322	35189	34733	56458	55219	54773
C <sub>13</sub>	40765	41809	42894	85362	84337	89342	45698	44879	45223
C <sub>14</sub>	456	544	655	3429	3672	3694	123609	132245	143935
C <sub>15</sub>	4563	4622	4712	2046	2003	1990	95672	96490	97884
C <sub>16</sub>	30986	31114	32145	34421	35443	38402	163211	17890	18901
C <sub>17</sub>	4087	5789	5874	23956	29834	30042	320	421	567
C <sub>18</sub>	4857	4987	5001	175343	174563	178344	460	557	607
C <sub>19</sub>	5460	5521	5622	33223	33220	33392	1544	1670	1809
C <sub>20</sub>	23408	24098	25410	74382	75352	78453	2343	3120	3211
Total	548625	560550	571351	346800	354087	364317	387159	252393	266914

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิส

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak )								
	เวลา (min)								
	60			90			120		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C <sub>8</sub>	25224	30057	26974	190348	200873	214566	283920	293340	300742
C <sub>9</sub>	24332	25934	26349	98700	99870	98654	134553	145532	154235
C <sub>10</sub>	39845	32998	40908	132490	133464	142333	123435	114352	124356
C <sub>11</sub>	23432	25879	28734	39096	40663	41232	32543	33445	34567
C <sub>12</sub>	34322	35189	34733	59038	58345	589997	34345	35470	34970
C <sub>13</sub>	85362	84337	89342	69083	67342	68764	6434	6553	6661
C <sub>14</sub>	3429	3672	3694	12033	11245	12113	34563	33212	34211
C <sub>15</sub>	2046	2003	1990	4065	4134	4211	6436	6541	6643
C <sub>16</sub>	34421	35443	38402	8304	8411	8566	32553	33245	32124
C <sub>17</sub>	23956	29834	30042	23334	24225	25123	7454	7588	7432
C <sub>18</sub>	175343	174563	178344	3450	3551	3648	4353	4467	4519
C <sub>19</sub>	33223	33220	33392	3423	3312	3411	8675	8790	8861
C <sub>20</sub>	74382	75352	78453	4523	4567	4411	3463	3310	3211
Total	346800	354087	364317	647887	660002	1217029	712727	725845	752532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพโดยค่านึงปัจจัยของปริมาณ  
ตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak )								
	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)								
	10			15			20		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C <sub>8</sub>	198475	200987	218770	219483	223561	211345	198749	201101	211897
C <sub>9</sub>	129384	135478	143344	94583	95655	96521	98734	99876	98760
C <sub>10</sub>	98456	99643	109867	184933	196770	200871	45363	46555	47565
C <sub>11</sub>	98744	97655	99878	34525	34566	35765	94803	95567	96641
C <sub>12</sub>	1345	1543	1675	29754	30078	31454	34535	32245	31120
C <sub>13</sub>	33351	34112	35312	3674	3731	3888	9485	9567	9661
C <sub>14</sub>	29642	30981	31024	13964	12345	13240	4352	4421	4321
C <sub>15</sub>	12885	13245	12321	27384	28765	29088	3498	3546	3689
C <sub>16</sub>	4534	4631	4754	1890	1908	2009	6543	6678	6780
C <sub>17</sub>	23475	24521	25431	59803	60096	61234	763	751	809
C <sub>18</sub>	94832	95321	96557	19373	20098	21333	1003	1180	1245
C <sub>19</sub>	9754	9621	9732	4685	4765	4871	908	1003	1146
C <sub>20</sub>	5444	5512	5432	4543	4654	4776	564	554	651
Total	740321	753250	794097	698594	716992	716395	499300	503044	514285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil)

### สูตรการคำนวณ

$$\frac{\text{ร้อยละการเลือกเกิดของสารที่คาร์บอนใด ๆ}}{\text{คาร์บอนใด ๆ}} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนใด ๆ}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมของน้ำมันชีวภาพ}} \times 100$$

### ตัวอย่างการคำนวณ

จากตารางที่ ข.8 พบว่าที่สภาวะการทดลองครั้งที่ 1 อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนเท่ากับ 8 อะตอม (C<sub>8</sub>) เท่ากับ 38430 และพื้นที่ใต้กราฟรวมของน้ำมันชีวภาพชีวภาพ เท่ากับ 321022

### จากสูตร

$$\begin{aligned} \frac{\text{ร้อยละการเลือกเกิดของคาร์บอน 8 อะตอม (C}_8\text{)}}{\text{คาร์บอน 8 อะตอม (C}_8\text{)}} &= \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอน 8 อะตอม}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมของน้ำมันชีวภาพ}} \times 100 \\ &= \frac{38430}{321022} \times 100 \end{aligned}$$

ดังนั้น ร้อยละการเลือกเกิดของคาร์บอน 8 อะตอม (C<sub>8</sub>) เท่ากับ 11.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ข.12 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของน้ำมัน  
ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส

Carbon number	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)								
	อุณหภูมิ (°C)								
	350			450			550		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C <sub>8</sub>	11.97	11.72	10.93	7.27	8.49	7.40	23.52	24.03	23.61
C <sub>9</sub>	10.75	10.81	11.22	7.02	7.32	7.23	5.44	5.58	5.81
C <sub>10</sub>	10.69	9.24	9.20	11.49	9.32	11.23	7.37	7.43	7.24
C <sub>11</sub>	13.46	14.37	17.09	6.76	7.31	7.89	6.13	5.97	6.13
C <sub>12</sub>	38.60	37.85	37.29	9.90	9.94	9.53	1.28	1.29	1.27
C <sub>13</sub>	7.26	7.88	6.91	24.61	23.82	24.52	14.86	14.50	14.79
C <sub>14</sub>	7.26	8.14	7.37	0.99	1.04	1.01	10.31	10.09	10.21
C <sub>15</sub>	0.00	0.00	0.00	0.59	0.57	0.55	12.63	12.65	12.57
C <sub>16</sub>	0.00	0.00	0.00	9.93	10.01	10.54	10.99	11.21	10.94
C <sub>17</sub>	0.00	0.00	0.00	6.91	8.43	8.25	0.65	0.62	0.62
C <sub>18</sub>	0.00	0.00	0.00	50.56	49.30	48.95	0.38	0.41	0.43
C <sub>19</sub>	0.00	0.00	0.00	9.58	9.38	9.17	0.87	0.85	0.87
C <sub>20</sub>	0.00	0.00	0.00	21.45	21.28	21.53	5.58	5.37	5.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของน้ำมัน  
ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิส

Carbon number	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)								
	อัตราการไหลของ N2 (ml/min)								
	40			80			120		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C <sub>8</sub>	38.36	39.86	39.50	7.27	8.49	7.40	23.47	36.15	34.59
C <sub>9</sub>	23.46	22.22	22.02	7.02	7.32	7.23	8.58	13.47	13.34
C <sub>10</sub>	8.85	8.51	8.44	11.49	9.32	11.23	0.06	0.10	0.10
C <sub>11</sub>	4.25	4.34	4.46	6.76	7.31	7.89	8.85	14.13	13.71
C <sub>12</sub>	4.20	3.94	4.18	9.90	9.94	9.53	14.58	21.88	20.52
C <sub>13</sub>	7.43	7.46	7.51	24.61	23.82	24.52	11.80	17.78	16.94
C <sub>14</sub>	0.08	0.10	0.11	0.99	1.04	1.01	31.93	52.40	53.93
C <sub>15</sub>	0.83	0.82	0.82	0.59	0.57	0.55	24.71	38.23	36.67
C <sub>16</sub>	5.65	5.55	5.63	9.93	10.01	10.54	42.16	7.09	7.08
C <sub>17</sub>	0.74	1.03	1.03	6.91	8.43	8.25	0.08	0.17	0.21
C <sub>18</sub>	0.89	0.89	0.88	50.56	49.30	48.95	0.12	0.22	0.23
C <sub>19</sub>	1.00	0.98	0.98	9.58	9.38	9.17	0.40	0.66	0.68
C <sub>20</sub>	4.27	4.30	4.45	21.45	21.28	21.53	0.61	1.24	1.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของน้ำมัน  
ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของเวลาในการไพโรไลซิส

Carbon number	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)								
	เวลา (min)								
	60			90			120		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C <sub>8</sub>	7.27	8.49	7.40	29.38	30.44	17.63	39.84	40.41	39.96
C <sub>9</sub>	7.02	7.32	7.23	15.23	15.13	8.11	18.88	20.05	20.50
C <sub>10</sub>	11.49	9.32	11.23	20.45	20.22	11.70	17.32	15.75	16.53
C <sub>11</sub>	6.76	7.31	7.89	6.03	6.16	3.39	4.57	4.61	4.59
C <sub>12</sub>	9.90	9.94	9.53	9.11	8.84	48.48	4.82	4.89	4.65
C <sub>13</sub>	24.61	23.82	24.52	10.66	10.20	5.65	0.90	0.90	0.89
C <sub>14</sub>	0.99	1.04	1.01	1.86	1.70	1.00	4.85	4.58	4.55
C <sub>15</sub>	0.59	0.57	0.55	0.63	0.63	0.35	0.90	0.90	0.88
C <sub>16</sub>	9.93	10.01	10.54	1.28	1.27	0.70	4.57	4.58	4.27
C <sub>17</sub>	6.91	8.43	8.25	3.60	3.67	2.06	1.05	1.05	0.99
C <sub>18</sub>	50.56	49.30	48.95	0.53	0.54	0.30	0.61	0.62	0.60
C <sub>19</sub>	9.58	9.38	9.17	0.53	0.50	0.28	1.22	1.21	1.18
C <sub>20</sub>	21.45	21.28	21.53	0.70	0.69	0.36	0.49	0.46	0.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 แสดงผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%Selectivity) ของน้ำมัน  
ชีวภาพโดยคำนึงปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส

Carbon number	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)								
	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)								
	10			15			20		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C <sub>8</sub>	26.81	26.68	27.55	31.42	31.18	29.50	39.81	39.98	41.20
C <sub>9</sub>	17.48	17.99	18.05	13.54	13.34	13.47	19.77	19.85	19.20
C <sub>10</sub>	13.30	13.23	13.84	26.47	27.44	28.04	9.09	9.25	9.25
C <sub>11</sub>	13.34	12.96	12.58	4.94	4.82	4.99	18.99	19.00	18.79
C <sub>12</sub>	0.18	0.20	0.21	4.26	4.20	4.39	6.92	6.41	6.05
C <sub>13</sub>	4.50	4.53	4.45	0.53	0.52	0.54	1.90	1.90	1.88
C <sub>14</sub>	4.00	4.11	3.91	2.00	1.72	1.85	0.87	0.88	0.84
C <sub>15</sub>	1.74	1.76	1.55	3.92	4.01	4.06	0.70	0.70	0.72
C <sub>16</sub>	0.61	0.61	0.60	0.27	0.27	0.28	1.31	1.33	1.32
C <sub>17</sub>	3.17	3.26	3.20	8.56	8.38	8.55	0.15	0.15	0.16
C <sub>18</sub>	12.81	12.65	12.16	2.77	2.80	2.98	0.20	0.23	0.24
C <sub>19</sub>	1.32	1.28	1.23	0.67	0.66	0.68	0.18	0.20	0.22
C <sub>20</sub>	0.74	0.73	0.68	0.65	0.65	0.67	0.11	0.11	0.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้