

การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลจากกากตะกอน
น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

FEASIBILITY STUDY ON THE PRODUCTION OF BIO-OIL
FROM INDUSTRIAL WASTEWATER SLUDGE VIA
PYROLYSIS PROCESS



สหกิจศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2561

FEASIBILITY STUDY ON THE PRODUCTION OF BIO-OIL
FROM INDUSTRIAL WASTEWATER SLUDGE VIA
PYROLYSIS PROCESS



A COOPERATIVE EDUCATION 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2018
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา

การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลจากกากตะกอน
น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผ่านกระบวนการไพโรไลซิส
Feasibility Study on the Production of Bio-oil from
Industrial Wastewater Sludge via Pyrolysis Process

ชื่อนักศึกษา

นางสาวณัฐนิชา ปูวาภิรมย์ 58050470

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
คุณวรพล พ่วงโกศล ประธานกรรมการ	
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการ	
ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอบอยล์จากกากตะกอน น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผ่านกระบวนการไพโรไลซิส
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐนิชา ปุวาภิรมย์ 58050470
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.กณินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

บทคัดย่อ

สหกิจศึกษานี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) จากกากตะกอนน้ำเสียของโรงงาน ไทยมิตรชูสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด ซึ่งจัดเป็นสารชีวมวลที่อยู่ในทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable resources) โดยสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในการแก้ปัญหาการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มากเกินไปในปัจจุบัน ซึ่งการเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นผลิตภัณฑ์หรือเชื้อเพลิงที่มีมูลค่ามากขึ้นสามารถทำได้โดยการนำชีวมวลเข้าสู่วิธีการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion process) โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 และ 40 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อนำกากตะกอนน้ำเสียไปหาค่าความร้อน โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ พบว่ากากตะกอนน้ำเสียมีค่าความร้อนเท่ากับ $5,745.12 \pm 32.31$ แคลอรีต่อกรัมของกากตะกอนน้ำเสีย และพบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ร้อยละผลผลิตของน้ำมันมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.33% โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณการเลือกเกิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน พบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที มีการกระจายตัวมากกว่า ดังนั้นการนำน้ำมันที่ได้มาใช้งานจะมีคุณภาพมากกว่าสภาวะที่ได้ร้อยละผลผลิตของน้ำมันมากที่สุด

คำสำคัญ : กากตะกอนน้ำเสีย, การเลือกเกิด, กระบวนการไพโรไลซิส, น้ำมันชีวภาพ, ร้อยละผลผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Feasibility study on the production of bio-oil from industrial wastewater sludge via pyrolysis process
Students	Miss Natnicha Puwapirom Student ID 58050470
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Asst.Prof.Dr.Montree Thongkam
Co-advisor	Dr.Glinsukol Suwannarat

Abstract

This cooperative study studies the possibility of producing bio-oil from industrial wastewater sludge (Thai Mitsui Specialty Chemical Co., Ltd.) which is classified as biomass in renewable resources. Which can be used as an alternative fuel to solve the problem of excessive use of current fuels. Which changing the biomass into more valuable products or fuels can be achieved by applying biomass into the thermochemical conversion process, through the pyrolysis process in a fixed bed reactor at a temperature of 400 and 500 °C. The flow rate of nitrogen gas is 20 and 40 ml/min. When wastewater sludge is taken to find the heat value by using a bomb calorie meter have the same calorific value of $5,745.12 \pm 32.31$ cal/g sewage sludge. And found that at 500 °C, the flow rate of nitrogen gas is 40 ml/min get the highest percentage of oil yield with an average of 58.33% by weight, the percentage of hydrocarbon selectivity was found that at a temperature of 400 °C, the nitrogen flow rate was 40 ml/min. More fragmented Therefore, the quality of the oil that is used will be higher than the condition that has the highest percentage of oil yield.

Keywords : Wastewater sludge, %Selectivity, Pyrolysis process, Bio-oil, %Yield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

สหกิจศึกษานี้สามารถสำเร็จได้เป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับคำปรึกษา คำแนะนำ และแก้ไข สหกิจศึกษานี้จนเสร็จสมบูรณ์ จาก ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาสหกิจศึกษา และ ดร.กลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในสหกิจศึกษานี้ ผู้วิจัยจึงกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณวรพล พวงโกศล ผู้จัดการฝ่ายยูทิลิตี้และพลังงาน ของบริษัท ไทยมิตซูบิชิเพาเวอร์ จำกัด ซึ่งเป็นประธานกรรมการสอบสหกิจศึกษา และ ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการสอบสหกิจศึกษา ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ อีกทั้งยังสละเวลาในการตรวจแก้ไขรายละเอียดให้กับสหกิจศึกษานี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำในการยืม-คืน และซ่อมแซม อุปกรณ์ในการทำสหกิจศึกษานี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความห่วงใยและคอยสนับสนุนตลอดมา รวมถึงเพื่อน ๆ และพี่ ๆ ทุกคนที่ให้ความสนใจและช่วยเหลือในทุก ๆ ปัญหาจนสามารถทำให้สหกิจศึกษานี้สำเร็จ ในที่สุด

สหกิจศึกษานี้หากมีประโยชน์และให้ความรู้แก่ผู้ทีนำไปศึกษาต่อ ผู้จัดทำขอมอบความดีนี้ให้กับ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของสหกิจศึกษา และหากมีความผิดพลาดประการใด ในสหกิจศึกษานี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ โอกาสนี้

ณัฐนิชา ปุวาริรมย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (Biomass).....	4
2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล.....	5
2.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีของชีวมวล.....	5
2.1.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (Heating Value).....	7
2.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial wastewater).....	8
2.3 กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Wastewater sludge).....	9
2.4 เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวล.....	10
2.4.1 กระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical conversion process).....	10
2.4.2 กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion process).....	10
2.5 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process).....	12
2.5.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส.....	13
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส.....	14
2.5.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	16
2.5.4 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส.....	16
2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ^k	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k..... 23
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	29
3.1.1 สารเคมี.....	29
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	29
3.2 วิธีการทดลอง.....	30
3.2.1 การเตรียมกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรม และการวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอนน้ำเสีย.....	30
3.2.2 การไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor).....	33
3.2.3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography).....	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	44
4.1 สมบัติของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	46
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของกากตะกอนน้ำเสีย.....	46
4.2 ผลวิเคราะห์เอกลักษณ์ของกากตะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส	47
4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	47
4.2.2 การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometry: EDS).....	48
4.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process).....	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process).....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง.....	58
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ภาคผนวก.....	61
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก	62
ภาคผนวก ข	68
ภาคผนวก ค	81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงข้อมูลของความเข้มข้นและจำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองที่มี การทำซ้ำ 3 ครั้ง.....	24
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม Metro 2.4.....	40
4.1 สภาวะที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสภาคตะกอนน้ำเสีย.....	44
4.2 ข้อมูลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน โดยมีการทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง.....	45
4.3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของภาคตะกอนน้ำเสียน้ำเสีย.....	46
4.4 แสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบของภาคตะกอนน้ำเสียที่และถ่านชาร์ที่ได้จาก กระบวนการไพโรไลซิส.....	49
ก.1 ข้อมูลการทดลองที่ใช้ในการคำนวณร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระบวนการไพโรไลซิสภาคตะกอนน้ำเสีย.....	62
ก.2 ผลการคำนวณร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภาคตะกอนน้ำเสีย.....	65
ข.1 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบ ออกเป็น 2กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Olefin) และกลุ่มโอเลฟิน (Paraffin) ในกระบวนการ ไพโรไลซิสครั้งที่ 1.....	70
ข.2 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Olefin) และกลุ่มโอเลฟิน (Paraffin) ในกระบวนการ ไพโรไลซิสครั้งที่ 1.....	71
ข.3 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบ ออกเป็น 2กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Olefin) และกลุ่มโอเลฟิน (Paraffin) ในกระบวนการ ไพโรไลซิสครั้งที่ 2.....	72
ข.4 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Olefin) และกลุ่มโอเลฟิน (Paraffin) ในกระบวนการ ไพโรไลซิสครั้งที่ 2.....	73
ข.5 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบ ออกเป็น 2กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Olefin) และกลุ่มโอเลฟิน (Paraffin) ในกระบวนการ ไพโรไลซิสครั้งที่ 3.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.6 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Olefin) และกลุ่มโอเลฟิน (Paraffin) ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 3	75
ข.7 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Olefin) และกลุ่มโอเลฟิน (Paraffin).....	76
ข.8 พื้นที่ได้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊ส ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 1	78
ข.9 พื้นที่ได้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊ส ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 2	78
ข.10 พื้นที่ได้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊ส ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 3	79
ข.11 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊ส ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนจำนวน 1-5 อะตอม	80
ค.1 ข้อมูลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่กำหนดก่อนออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบ 2^k	81
ค.2 ข้อมูลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมัน โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง 8	81
ค.3 ผลต่างของปริมาณผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันและค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันทั้งหมด โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง.....	82
ค.4 ผลรวมของปริมาณผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในแต่ละสภาวะจากตารางที่ ค.2 โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง	82
ค.5 ค่ากำลังสองของผลต่างของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง	82
ค.6 Anova ของการทดลองที่มี 2 ปัจจัย	84
ค.7 ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลจากตารางที่ ค.1	84
ค.8 ผลต่างของข้อมูลจากตารางที่ ค.1 และตารางที่ ค.6.....	85
ค.9 ข้อมูลแสดงส่วนตกค้างและความพอเพียงของแบบจำลอง.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Wastewater sludge).....	10
2.2 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสและการนำไปใช้ประโยชน์.....	13
2.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactor).....	17
2.4 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสชนิดฟลูอิดซ์แบบฟองก๊าซ (Bubbling Fluidized Bed).....	18
2.5 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสชนิดฟลูอิดซ์แบบไหลเวียน (Circulating Fluidized Bed).....	19
2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบให้ความร้อนด้วยการเสียดสี (Ablative Pyrolysis Reactor).....	20
2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger Reactor).....	21
2.8 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบกรวยหมุน (Rotating Cone Pyrolysis Reactor).....	22
2.9 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum Pyrolysis Reactor).....	23
2.10 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2 ^k	24
3.1 กากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง...	31
3.2 ครกและสากที่ใช้บดกากตะกอนน้ำเสีย.....	31
3.3 ตะแกรงร่อนกากตะกอนน้ำเสียให้มีขนาด 500 และ 850 ไมโครเมตร.....	32
3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy: SEM-EDS).....	32
3.5 เหล็กแท่งที่ตันโยแก้วลงไปเครื่องปฏิกรณ์.....	33
3.6 ทราจควอตซ์ที่กระจายไปทั่ว ๆ กากตะกอนน้ำเสีย.....	34
3.7 ประแจแหวนข้างปากตายขนาด 27 และ 30 มิลลิเมตร ชั้นอุปกรณ์ควบคุม ด้วยความเย็น.....	34
3.8 เครื่องควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Main switch).....	35
3.9 ตัวอย่างการตั้งค่าอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ที่ 500 องศาเซลเซียส.....	35
3.10 ขวดรูปชมพู่เชื่อมต่อกับสายยางที่เป็นทางผ่านของแก๊สจากถังแก๊ส.....	36
3.11 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Glass tube rotameter, RT 1).....	36
3.12 สวิตช์อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ (Furnace 2).....	37
3.13 สวิตช์อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่นำความร้อน (Pipe heat 2).....	37
3.14 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	38
3.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	38
3.16 ช่องใส่ขวดเตรียมวิเคราะห์สารของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ของเหลว..	40
3.17 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของของเหลว.....	41
3.18 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของแก๊ส.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2^k ที่ใช้ในการทดลอง.....	45
4.2 โครงสร้างสัณฐานของกากตะกอนน้ำเสีย ที่กำลังขยาย 2500 เท่า.....	47
4.3 โครงสร้างสัณฐานของถ่านชาร์ที่ได้หลังจากกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2500 เท่า.....	48
4.4 ค่าร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของแก๊ส น้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	50
4.5 ค่าร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของแก๊ส น้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที.....	50
4.6 ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม จากกระบวนการ ไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิ 400 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 ml/min.....	51
4.7 ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม จากกระบวนการ ไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิ 400 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 ml/min.....	52
4.8 ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม จากกระบวนการ ไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิ 500 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 ml/min.....	52
4.9 ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม จากกระบวนการ ไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิ 500 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 ml/min.....	53
4.10 ค่าร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติหากนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.11	ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 5 อะตอม จากกระบวนการไพโรไลซิส....	55
ก.1	ค่าร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที.....	66
ค.1	ค่าความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง.....	86
ค.2	อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสที่มีผลต่อส่วนตกค้าง.....	86
ค.3	อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสที่มีผลต่อส่วนตกค้าง.....	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
°C	องศาเซลเซียส (degrees Celsius)
wt%	ร้อยละโดยน้ำหนัก (percentage by weight)
kcal/kg	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (kilocalories per kilogram)
MJ/ton	เมกะจูลต่อตัน (Megajoules per ton)
ml/min	มิลลิลิตรต่อนาที (milliliters per minute)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานที่ใช้อยู่ในโลกปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพลังงานใช้แล้วหมดไป ซึ่งหากมีการใช้พลังงานในระดับที่เป็นอยู่และไม่มีการค้นพบเพิ่มเติมแล้ว จะเกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ถ้าเริ่มนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 เป็นต้นมา โลกจะมีแหล่งสำรองน้ำมันใช้ไปได้อีกประมาณ 42 ปี แก๊สธรรมชาติอีกประมาณ 64 ปี และถ่านหินอีกประมาณ 220 ปี เท่านั้น [1] โดยน้ำมันเชื้อเพลิงนับว่าเป็นทรัพยากรที่สำคัญและจำเป็นมากในสังคมปัจจุบัน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตประจำวันของประชากร ไม่ว่าจะเป็นในด้านการคมนาคม การขนส่ง การผลิตสินค้าสำหรับการอุปโภคและการบริโภค ปัญหาการลดลงของน้ำมันเชื้อเพลิงจึงกลายเป็นปัญหาใหญ่และส่งผลกระทบเป็นวงกว้าง เนื่องจากน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป และน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงจนอาจทำให้หมดไปในอีกไม่กี่สิบปีข้างหน้า แต่ในทางกลับกัน น้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการผลิตและการพัฒนาประเทศในด้านการอุตสาหกรรม ทำให้ความต้องการของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงนั้นมีมากขึ้น แต่ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นมีอยู่อย่างจำกัด ราคา น้ำมันเชื้อเพลิงในปัจจุบันจึงมีราคาสูงขึ้น นอกจากนี้ปัญหาค้าน้ำมันเชื้อเพลิงแล้ว ยังมีปัญหาในเรื่องของภาวะโลกร้อน (Global warming) ที่เกิดจากการใช้พลังงานเพื่อการเผาไหม้ถ่านหินและน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสรรพสิ่งบนโลกอย่างมากมายอีกด้วย [2]

การหาพลังงานทดแทนที่มีราคาถูกและปริมาณเพียงพอต่อการนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานสิ้นเปลืองจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งสารชีวมวล (Biomass) เป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่คงรูปใน 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยการผลิตหรือได้รับการแปรรูปมาจากวัตถุดิบอินทรีย์ที่อาจได้มาจากสิ่งมีชีวิตโดยตรง หรือได้จากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ขยะจากชุมชน น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงปิโตรเลียม ชีวมวลสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรงจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion process) เช่น น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) จากกระบวนการไพโรไลซิสของขยะหรือกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นต้น ซึ่งการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นสามารถลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งจัดเป็นชีวมวลประเภทหนึ่ง ได้ถูกให้ความสนใจในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการขยายตัวและมีความก้าวหน้ามากขึ้น สิ่งที่ตามมาจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมนี้ คือ ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะทางอากาศ น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต ขยะมูลฝอย เป็นต้น ซึ่งจัดเป็นปัญหาสำคัญของโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียที่เกิดขึ้นนี้ทางโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องทำการบำบัดก่อน เพื่อให้ได้มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่ใช้ระบบบำบัดแบบชีววิทยา จึงทำให้ได้กากตะกอนน้ำเสีย (Wastewater sludge) ออกมาเป็นจำนวนมาก การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนน้ำเสียเหล่านี้ เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพแล้วก็สามารถนำมาใช้ปรับปรุงดิน หมักทำเป็นปุ๋ย หรือนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนภายในโรงงานอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นจึงเป็นการลดต้นทุนในขั้นตอนของกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมได้

สหกิจศึกษาจึงมุ่งเน้นทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยการนำกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปซียลตี้เคมีคอล จำกัด ซึ่งกากตะกอนน้ำเสียที่นำมาศึกษานั้นได้มาจากกระบวนการผลิตเรซิน และสารยึดเกาะ (Binder) ในอุตสาหกรรมกระดาษ ไม้ กุ้งขมม เป็นต้น แล้วผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน นอกเหนือจากการนำกากตะกอนเหล่านี้ไปกำจัดทิ้งอย่างไร้ประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปซียลตี้เคมีคอล จำกัด
2. เพื่อศึกษาอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เหมาะสมซึ่งส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวในกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย โดยเตาปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor)
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และแก๊ส (Gas) ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปซียลตี้เคมีคอล จำกัด โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส ได้แก่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ส่วนอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการไพโรไลซิส ได้แก่ 20 และ 40 มิลลิลิตรต่อนาที โดยออกแบบการทดลองเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสีย โดยศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy: SEM-EDS) การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value) และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณเถ้า (Ash content) ปริมาณสารที่สามารถระเหยได้ (Volatile matters) และปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon)
3. ศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในส่วนของของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพและแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (Gas Chromatography – Flame Ionization Detector or GC-FID)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สถานะของอนุกรมและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูยสเปเชียลตีเคมีคอล จำกัด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) มากที่สุด
2. เพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
3. สามารถลดต้นทุนในการผลิตและขั้นตอนการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียได้ โดยการนำน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียมาใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไปได้
4. เพิ่มพลังงานทางเลือกอีกทางหนึ่ง และลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (Biomass) [3]

ชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (Biomass) คือ สารอินทรีย์ทุกรูปแบบที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทน (Renewable Energy) ต่อไปได้ โดยไม่นับการกลายเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลไปแล้ว โดยส่วนใหญ่ได้มาจากกากหรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น แกลบ ซึ่งได้จากการสีข้าว เปลือกชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย ฟางข้าว เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากป่าไม้ เส้นใยและกะลาปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง สำเหล้า ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ ซังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก กาบและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือก เพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตเป็นน้ำกะทิและน้ำมันมะพร้าว ขยะมูลฝอยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งมูลสัตว์ต่าง ๆ เป็นต้น

ในปัจจุบันได้มีความสนใจในการนำพลังงานชีวมวลมาใช้มากขึ้น เนื่องจากชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ โดยในขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืช พืชสามารถสร้างพลังงานได้โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และยังสามารถเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงจนได้พลังงานออกมาแล้วเก็บอยู่ในรูปแป้งและน้ำตาล เก็บสะสมไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็จะทำให้ได้พลังงานออกมา นอกจากนี้ชีวมวลสามารถนำไปใช้เพื่อผลิตเป็นพลังงานโดยตรงหรือเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) จากกระบวนการไพโรไลซิสของเศษไม้ ขยะมูลฝอยหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas) จากการหมักขยะ หรือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และสามารถนำชีวมวลเหล่านี้มาผ่านกระบวนการเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า

การนำชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงมีข้อดีหลายประการ [4] ได้แก่

1. การเผาไหม้สารทุกชนิดจะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมีอยู่ทั่วไปในอากาศ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องลงมายังโลก รังสีบางส่วนไม่สามารถสะท้อนกลับออกไปได้ ทำให้โลกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงเรียกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าเป็นแก๊สเรือนกระจก (Green House Gas) แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นถูกพืชนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้นการเผาไหม้ชีวมวลจึงไม่ทำให้เกิดแก๊สเรือนกระจกหรือเกิดในปริมาณน้อย (Carbon offset)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การดูแลของสถาบันฯ เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารฉบับนี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ซี้เถ้า (Ash) ที่ได้จากชีวมวลมีสภาพเป็นต่าง ดังนั้นเหมาะสมที่จะนำไปเพาะปลูกหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด
3. ช่วยลดงบประมาณในการนำชีวมวลไปกำจัด ผึ่งกลบหรือเผาทิ้ง เป็นต้น
4. ชีวมวลจะมีปริมาณกำมะถัน (Sulfur) ไม่เกิน 0.2% โดยน้ำหนัก ฉะนั้นชีวมวลที่นำมาเผาไหม้จะไม่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องฝนกรด

2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

2.1.1.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content) เป็นปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งชีวมวลส่วนใหญ่จะมีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูง ถ้าชีวมวลที่มีความชื้นสูงประมาณ 50% โดยน้ำหนัก เช่น ชานอ้อย มูลสัตว์ กากน้ำตาล เป็นต้น จะเรียกประเภทของชีวมวลนี้ว่า “Wet Conversion Process” ส่วนชีวมวลที่มีความชื้นต่ำ เช่น ฟางข้าว เศษไม้ แกลบ ตะกอนน้ำเสีย เป็นต้น จะเรียกว่า “Dry Conversion Process”

2.1.1.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) ส่วนที่เผาไหม้ได้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ Volatiles matter หรือสารที่สามารถระเหยได้ง่าย เป็นส่วนที่ลุกติดไฟหรือเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลใดที่มีค่า Volatiles matter สูง แสดงว่าลุกติดไฟได้ง่าย และ Fixed carbon หรือ คาร์บอนคงที่ คือองค์ประกอบที่สามารถให้ความร้อนได้ ยิ่งค่าคาร์บอนคงที่มาก ค่าความร้อนก็จะยิ่งสูง นั่นคือโครงสร้างโมเลกุลของชีวมวลมีความเสถียรมาก

2.1.1.3 ส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ หรือซี้เถ้า (Ash) เป็นส่วนประกอบที่มีอยู่เดิมในชีวมวล ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีปริมาณซี้เถ้า น้อย ประมาณ 1-3% โดยน้ำหนัก ยกเว้นฟางข้าวและแกลบ ซึ่งมีปริมาณซี้เถ้าค่อนข้างสูงถึง 10-16% โดยน้ำหนัก

2.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีของชีวมวล

การวิเคราะห์โครงสร้างของชีวมวล ทั้งนี้เนื่องจากชีวมวลนั้นมีความหลากหลายมาก ทำให้คุณสมบัติบางประการนั้นมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมและความเป็นไปได้ที่จะนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้งานแล้วเกิดประโยชน์สูงสุด

2.1.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของชีวมวล เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนรูปของชีวมวลไปเป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตเป็นพลังงานจะมีรูปร่างแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสถานะของเชื้อเพลิง เช่น แก๊สธรรมชาติอยู่ในสถานะแก๊ส น้ำมันดิบอยู่ในสถานะของเหลว ถ่านหินอยู่ในสถานะของแข็ง แต่โดยส่วนใหญ่ชีวมวลจะมีลักษณะเป็นของแข็ง มีน้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ และการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของชีวมวลมีรายละเอียด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความชื้นของชีวมวล เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงเมื่อนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ถ้าชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูงมาก ประมาณ 80-90% โดยน้ำหนัก ก็ไม่เหมาะสมในการนำมาเปลี่ยนรูปเป็นเชื้อเพลิง แต่ถ้าหากนำมาผ่านกระบวนการบีบอัด (Dewatering) เพื่อลดปริมาณความชื้นก่อนนำไปเป็นเชื้อเพลิง และในกรณีที่ชีวมวลมีปริมาณความชื้นประมาณ 50-60% โดยน้ำหนัก ถ้านำมาเก็บทิ้งไว้ในระยะเวลาหนึ่ง ความชื้นจะสามารถลดลงตามธรรมชาติได้ แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ

2. ขนาดของชีวมวล ถ้าชีวมวลมีขนาดใหญ่เกินไป ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เพราะทำให้ประสิทธิภาพของการเป็นเชื้อเพลิงต่ำลง ดังนั้นจึงต้องนำมาหั่นย่อยหรือบดชีวมวลให้มีขนาดเล็กลงก่อน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของการเป็นเชื้อเพลิงดีขึ้น แต่ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมสำหรับบดชีวมวลให้มีขนาดเล็กลง

3. สิ่งเจือปนที่ติดมากับชีวมวล เช่น หิน กรวด ทราย เศษดิน เป็นต้น สิ่งเจือปนที่มากับชีวมวลเป็นสิ่งที่ต้องระมัดระวัง เพราะเมื่อชีวมวลถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นเชื้อเพลิงจะต้องอาศัยความร้อน หากสิ่งเจือปนเหล่านี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง อาจทำให้เกิดการอุดตันภายในท่อของเครื่องปฏิกรณ์ได้

4. ปริมาณขี้เถ้าของชีวมวล มีผลต่อการนำมาเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวล ดังนั้นการออกแบบเตาปฏิกรณ์ในการเปลี่ยนรูปของชีวมวล จึงต้องพิจารณาถึงการเก็บขี้เถ้าออกมาจากเตาปฏิกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.1.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของชีวมวล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาโครงสร้างหรือองค์ประกอบที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งองค์ประกอบของชีวมวลประกอบด้วย ปริมาณความชื้น (Moisture content) สารที่สามารถระเหยได้ (Volatiles matter) คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) และขี้เถ้า (Ash)

โดยมีวิธีการวิเคราะห์ คือ เผาไหม้ชีวมวลหรือเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส แสดงถึงน้ำหนักที่หายไปจากชีวมวล คือ ความชื้น (Moisture) จากนั้นนำชีวมวลมาเผาไหม้ในภาชนะปิดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แสดงถึงน้ำหนักที่ลดลง คือ สารที่สามารถระเหยได้ (Volatiles matter) และเชื้อเพลิงส่วนที่เหลือจะถูกนำมาเผาไหม้ต่อที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในสภาวะเปิด แสดงถึงส่วนที่ถูกเผาไหม้นั้นคือ คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) และส่วนที่เผาไหม้ไม่หมด คือ ขี้เถ้า (Ash)

2. การวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุประกอบด้วย 4 ธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน (Carbon) ไนโตรเจน (Nitrogen) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ออกซิเจน (Oxygen) และธาตุอื่น ๆ ที่มีสัดส่วนน้อย เช่น กำมะถัน (Sulfur) และคลอรีน (Chlorine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีวิธีการวิเคราะห์ คือ เริ่มจากการหาค่าของธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนด้วยวิธีการเผาไหม้ ส่วนธาตุไนโตรเจนและกำมะถัน ใช้กระบวนการทางเคมี ส่วนธาตุออกซิเจนไม่ทำการวิเคราะห์ แต่จะได้จากการใช้ปริมาณส่วนที่เหลือจากการหาค่าของธาตุอื่น ๆ นอกจากนี้ อาจมีการตรวจหาธาตุคลอรีน หากธาตุคลอรีนนั้นมีปริมาณมากเพียงพอ

2.1.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (Heating Value)

การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (Heating Value) มีวิธีวิเคราะห์ด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่

1. ค่าความร้อนต่ำสุด (Low Heating Value, LHV) หมายถึง ค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่าต่ำ ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้อยู่ในรูปของไอน้ำ นอกจากนี้ในการใช้ความร้อนในปริมาณที่เท่ากับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ซึ่งเกิดจากการนำชีวมวล 1 กิโลกรัม มาหาค่าความร้อน ดังนั้นค่าที่วัดได้ คือ ค่าความร้อนต่ำสุด (LHV) ต่อ กิโลกรัม

2. ค่าความร้อนสูงสุด (High Heating Value, HHV) หรือค่าความร้อนทั้งหมด (Gross Heating Value, GHV) หมายถึง ค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่าสูง เป็นส่วนที่มีความชื้นเจือปนอยู่ โดยความชื้นนี้เกิดจากไอน้ำที่ได้จากการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนในขณะที่มีการเผาไหม้ ซึ่งหาค่าความร้อนสูงสุดได้ โดยการนำชีวมวล 1 กิโลกรัม มากำจัดน้ำหรือลดความชื้นลงด้วยการเผาไหม้สมบูรณ์ และน้ำที่อยู่ในชีวมวลจะเปลี่ยนรูปเป็นไอน้ำ ดังนั้นค่าที่วัดได้ คือ ค่าความร้อนสูงสุด (HHV) ต่อ กิโลกรัม นอกจากนี้ค่าความร้อนสูงสุดก็มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำสุด ดังนี้

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 5.72(9H + M) \text{ kcal/kg}$$

$$\text{หรือ} \quad \text{HHV} = \text{LHV} + 23.95(9H + M) \text{ kcal/kg}$$

โดยที่ H = ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล

M = ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล

HHV = ค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวล (MJ/ton)

LHV = ค่าความร้อนต่ำสุดของชีวมวล (MJ/ton)

3. ค่าความร้อนแห้ง (Dry Heating Value) หมายถึง การนำชีวมวลจำนวนหนึ่งมากำจัดน้ำออกหรือลดความชื้นลง แล้วแยกน้ำหนักแห้งที่ได้ออกมา 1 กิโลกรัม เพื่อนำมาหาค่าความร้อนแห้งค่าที่วัดได้ คือ ค่าความร้อนแห้งต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ค่าความร้อนแห้งมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสูงสุด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Dry Heating Value} = \text{HHV} \times \frac{100}{(100 - M)}$$

โดยที่ M = ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล

HHV = ค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวล (MJ/ton)

2.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) [7]

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการอุตสาหกรรมในทุกขั้นตอนการผลิต ตั้งแต่การล้างวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การล้างอุปกรณ์และเครื่องจักรกลที่ใช้ ยังรวมไปถึงน้ำที่ได้จากการทำความสะอาดและกิจกรรมต่าง ๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม โดยองค์ประกอบของน้ำเสียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ไขมันหรือน้ำมัน โลหะหนักและสารพิษ เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. สารอินทรีย์ เป็นสารที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นสัตว์หรือว่าพืช โดยธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ คือ คาร์บอน (Carbon) และไฮโดรเจน (Hydrogen)
2. สารอนินทรีย์ เป็นแร่ธาตุที่ไม่ทำให้น้ำเน่าเสีย แต่อาจเป็นแร่ธาตุที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดสารอนินทรีย์เหล่านี้ในระบบบำบัดน้ำเสียด้วย
3. โลหะหนักและสารพิษอื่น ๆ ที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ เช่น ปรอท ทองแดง โครเมียม
4. ไขมันและน้ำมัน เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นน้ำมัน ซีฟิง ไขมัน รวมถึงน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กับเครื่องจักร หรือในด้านการคมนาคมขนส่ง ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดอย่างถูกวิธี
5. ความร้อน จะทำให้น้ำเน่าเสีย เนื่องจากความร้อนจะไปเร่งปฏิกิริยาการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในน้ำ จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำนั้นลดลง ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียควรมีอุณหภูมิอยู่ที่ 25-35 องศาเซลเซียส เพราะความร้อนในน้ำเสียจะทำให้จุลินทรีย์บางชนิดเติบโตช้า ซึ่งมีผลต่อระบบบำบัด ดังนั้นจึงต้องปรับอุณหภูมิของน้ำเสียให้เหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย
6. ของแข็ง เป็นตะกอนที่เกิดภายหลังจากการระเหยด้วยไอน้ำและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส โดยตะกอนที่เกิดขึ้นนี้มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ การตรวจวัดค่าของแข็งนี้สามารถทำได้ในทั้งน้ำประปา น้ำทิ้งจากครัวเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม
7. ความเป็นกรดและด่าง (pH) น้ำที่มีคุณภาพที่ดีจะต้องมีค่า pH ใกล้เคียงหรือเท่ากับ 7 แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ค่า pH มาตรฐานของน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 5-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 7 แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ค่า pH มาตรฐานของน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 5-9
 ไม่ควรกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สีและความขุ่น เกิดจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ อุตสาหกรรมฟอกหนัง และ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น ซึ่งความขุ่นจะทำให้ประสิทธิภาพของน้ำเสียที่นำมาบำบัดนั้นลดลง

9. จุลินทรีย์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีลักษณะเป็นเช่นไรนั้น ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและ กระบวนการผลิตที่โรงงานอุตสาหกรรมนั้น ๆ ใช้ เช่น ถ้าเป็นอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม น้ำเสียจะประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นหลัก แต่ถ้าเป็นอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ เป็นต้น อุตสาหกรรมเหล่านี้ล้วนใช้สารอินทรีย์ เป็นส่วนประกอบในการผลิต และก่อนที่จะนำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมไปบำบัดทางชีววิทยาใน ขั้นตอนสุดท้าย จะต้องมีการกำจัดพวกโลหะหนักและสารอินทรีย์ที่เป็นพิษออกจากรน้ำเสียก่อน เพื่อ สุดท้ายแล้วในการบำบัดทางชีววิทยา จะได้กากตะกอนออกมาเป็นจำนวนมาก การนำไปใช้ประโยชน์ ของกากตะกอนน้ำเสียจึงเป็นสิ่งสำคัญ เช่น การนำกากตะกอนไปหมักทำเป็นปุ๋ย หรือไปผ่าน กระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงแล้วได้เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น

2.3 กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Wastewater sludge) [7]

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่ ในปริมาณมาก การบำบัดน้ำเสียที่นิยมเป็นระบบแบบชีววิทยา คือ อาศัยจุลินทรีย์ช่วยย่อยสลายสิ่ง สกปรกที่มีอยู่ในน้ำเสียให้หมดไปหรือมีความสะอาดมากพอตามมาตรฐานก่อนจะระบายทิ้ง โดยไม่ทำ ให้แหล่งน้ำนั้นเน่าเสียหรือเกิดความเสียหาย สิ่งสกปรกซึ่งเป็นพวกสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปที่สามารถ ละลายน้ำได้และอยู่ในรูปคอลลอยด์ โดยจุลินทรีย์ได้ทำการย่อยสลายแล้วนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการ ย่อยสลายนี้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เซลล์จุลินทรีย์ตัวใหม่ น้ำ และพลังงาน สารอินทรีย์ที่เป็น องค์ประกอบในน้ำเสียเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนมาเป็นเซลล์จุลินทรีย์ ซึ่งทั่วไปแล้วเซลล์จุลินทรีย์นั้น ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ร้อยละ 70-90 โดยน้ำหนัก และสารอนินทรีย์อีกร้อยละ 10-30 โดย น้ำหนัก ตะกอนของจุลินทรีย์นั้นมีน้ำหนักมาก จึงสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายด้วยถังตกตะกอน และตะกอนจุลินทรีย์จะถูกสูบออกจากถังตกตะกอน จึงเรียกตะกอนนี้ว่า “กากตะกอนน้ำเสีย (Wastewater sludge)” ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อได้กากตะกอนน้ำเสียออกมาแล้ว จะทำการปรับ สภาพก่อนแล้วนำไปกำจัด ซึ่งการนำไปกำจัดและใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น นำกาก ตะกอนน้ำเสียมาใช้ในการปรับปรุงดิน หมักทำเป็นปุ๋ย หรือนำไปถมที่ก็ได้ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Wastewater sludge)

2.4 เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวล

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.4.1 กระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical Conversion Process)

กระบวนการทางชีวเคมีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

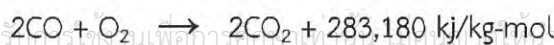
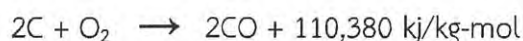
1. Biochemical liquefaction
2. Microbial gasification

2.4.2 กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion Process)

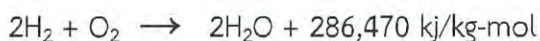
กระบวนการทางเคมีความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) เป็นการนำเอาชีวมวลมาผ่านการเผา โดยเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันของชีวมวลกับแก๊สออกซิเจน (O_2) เพื่อทำให้เกิดการจุดระเบิด (จุดวาบไฟ) และคายความร้อนออกมา ความร้อนที่ได้นี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้า หรือการให้ความร้อนแก่เครื่องจักร เป็นต้น ในกระบวนการการเผาไหม้ส่วนใหญ่อยู่ในสถานะของอากาศที่มีแก๊สออกซิเจนอยู่ 21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หรือ 23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ เช่น คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) แก๊สออกซิเจน (O_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จึงสามารถทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งเป็นแก๊สที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ [11]

สมการการเผาไหม้ที่สมบูรณ์แสดงได้ดังนี้ [9]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ถ้าชีวมวลหรือเชื้อเพลิงนั้นมีซัลเฟอร์และไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ สมการแสดงได้ดังนี้

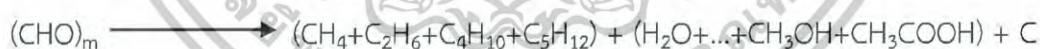


สมการการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แสดงได้ดังนี้



2. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ให้เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และแก๊สชีวภาพ (Biogas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง 400-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เนื่องจากอยู่ในสถานะของเหลวที่มีข้อดีในด้านการจัดเก็บและการขนส่ง [12]

สมการของกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) แสดงได้ดังนี้



เมื่อนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) จะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส เช่น แก๊สมีเทน แก๊สบิวเทน แก๊สเพนเทน เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะของเหลว เช่น น้ำ เมทานอล กรดแอซิดิก เป็นต้น และผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะของแข็งก็คือ ถ่านชาร์

3. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลทั้งในรูปของแข็งและของเหลวให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้อากาศ ออกซิเจนหรือน้ำในกระบวนการเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีภายในเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biogas) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สมีเทน (CH₄) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) โดยแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงที่ผลิตได้นี้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายกว่าการใช้เชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากการเผาไหม้โดยตรง หรืออาจเรียกว่าเป็นการผลิตแก๊สที่ติดไฟได้ (Combustible gas) ความร้อนที่ใช้ในการผลิตแก๊สเกิดขึ้นในส่วนของ การเผาไหม้ชีวมวล ซึ่งจะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 600-900 องศาเซลเซียส เช่นนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์เบนซิน หรือเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลง เพื่อไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ข้อเสียคือ มีน้ำมันดิน (Tar) ที่ออกมาพร้อมกับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วย จึงจำเป็นต้องกำจัดน้ำมันดินเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อไม่ทำให้เครื่องยนต์เสียหาย เชื้อเพลิงหุงต้ม หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหัวเผาชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

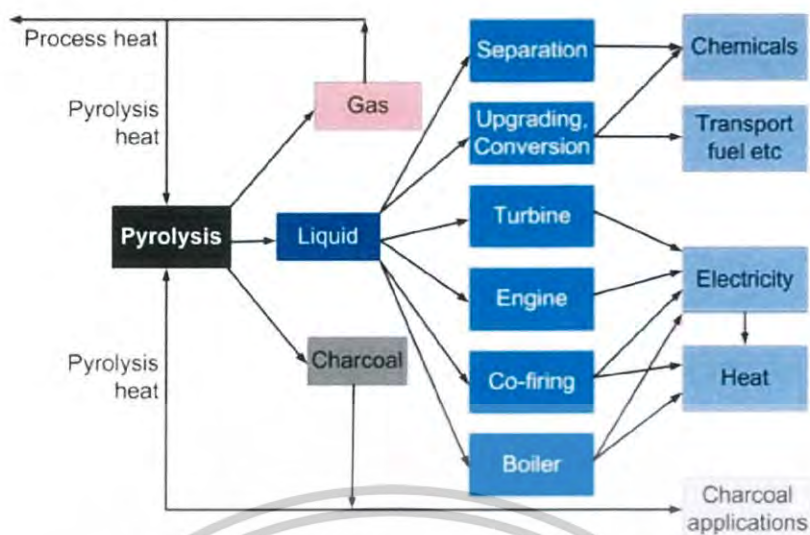
สมการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) แสดงได้ดังนี้



2.5 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) [14]

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ ด้วยการใช้ความร้อนปานกลาง ในสภาวะบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 3 สถานะ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยได้จะกลายเป็นแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ซึ่งก็คือผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สบางส่วนนั้นถูกควบแน่นไปเป็นของเหลว โดยทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมัน หรือเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถระเหยได้ จะกลายเป็นของแข็งหรือเรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (Primary product) โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน อัตราเร็วในการให้ความร้อน เป็นต้น และในกระบวนการไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุดคือของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ผลผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสและการนำไปใช้ประโยชน์ [15]

ความร้อนที่ให้แก่เครื่องปฏิกรณ์ของกระบวนการไพโรไลซิส ถูกถ่ายเทไปให้กับชีวมวลที่อยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ด้วยอุณหภูมิ ประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะ คือ แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ที่เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ ซึ่งสามารถนำเอาผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิเหล่านี้มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้ เช่น นำเอาน้ำมันที่เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง เพื่อผลิตคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) ซึ่งคาร์บอนแบล็กจัดเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ [16]

ขั้นตอนของปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการไพโรไลซิสแสดงได้ดังนี้

1. ขั้นที่ 1 สารที่สามารถระเหยได้ง่ายจะระเหยออกจากชีวมวล (Devolatilization)
2. ขั้นที่ 2 การแตกตัวของชีวมวล โดยองค์ประกอบที่สามารถแตกตัวภายใต้สภาวะที่ใช้

แตกตัวได้เป็นโมเลกุลที่เล็กลงเรื่อย ๆ ตามเวลาหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง จนกระทั่งการแตกตัวของชีวมวลนั้นสมบูรณ์

อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการให้ความร้อนและเวลาที่มากเกินไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของชีวมวลจะกลับมารวมตัวกัน แล้วกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากขึ้นออกจากกระบวนการ หรืออาจกลายเป็นของแข็งชั้นเหนียวติดอยู่ตามอุปกรณ์ต่าง ๆ ก็ได้ ดังนั้น สภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่ใช้ในการทดลองด้วย

2.5.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับสภาวะปฏิบัติการที่ใช้ โดยใช้เวลาหรืออัตราการ

เกิดปฏิกิริยาเป็นเกณฑ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าหรือแบบทั่วไป (Conventional pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ทำให้ปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชีวมวลที่ใช้ในการทดลองจะมีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบช้า ส่วนใหญ่จะได้ออกมาเป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และถ่าน (Charcoal)

นอกจากนี้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้านี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการย่อย คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) และกระบวนการคาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (Carbonization pyrolysis) โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในเวลาที่ยาวนาน นานคือ 15-30 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะได้ครบทั้ง 3 สถานะ คือ แก๊สชีวภาพ (Biogas) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และถ่าน (Char) ส่วนกระบวนการคาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสจะเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลานาน โดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านซึ่งใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการประกอบอาหาร และผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะแก๊สจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ

และเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้านี้ได้น้ำมันเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นน้ำมันเหล่านี้จึงถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้

2. กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ทำให้ปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 400-1,000 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อ นาที) โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของชีวมวลหรือวัตถุดิบที่ใช้จะมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วนี้จะได้แก๊สชีวภาพ (Biogas) และน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เป็นส่วนใหญ่ น้ำมันชีวภาพที่ได้นั้นประกอบไปด้วยสารประกอบโอเลฟินส์ (Olefin) โดยเกิดจากการกลั่นตัวของไอหรือแก๊สแล้วกลายเป็นของเหลว นั่นก็คือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) นั้นเอง ซึ่งสามารถนำไปสังเคราะห์เป็นสารเคมีอื่น ๆ และปรับปรุงเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นประโยชน์ต่อไปได้

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

โดยส่วนใหญ่การไพโรไลซิสมักสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยปัจจัยทางเคมีที่สำคัญคือ ธาตุ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ปัจจัยพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลต่อการไพโรไลซิสดังนี้

1. องค์ประกอบของชีวมวล องค์ประกอบของชีวมวลเป็นสิ่งที่กำหนดปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่จะส่งผลต่อการแตกตัวของชีวมวล องค์ประกอบและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยแบ่งช่วงอุณหภูมิออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

2.1 ขั้นที่ 1 อุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 135 °C ในขั้นนี้สารที่ระเหยออกมาส่วนใหญ่จะเป็นความชื้นในชีวมวล

2.2 ขั้นที่ 2 ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 135-400 °C สารที่สามารถระเหยได้ประมาณ 75% จะระเหยออกมาในช่วงนี้

2.3 ขั้นที่ 3 ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400 ถึง 600 °C โดยที่หลังจากอุณหภูมิกเกิน 600 °C ไปแล้ว กระบวนการไพโรไลซิสจะสิ้นสุดลงและจะไม่มีสารระเหยออกมาอีก

3. อัตราการให้ความร้อน อัตราการให้ความร้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของเหลวจะลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อน

ในกระบวนการไพโรไลซิส ถ้ามีอัตราการให้ความร้อนเร็วจะทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยได้เป็นจำนวนมาก และได้ถ่านชาร์น้อย การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวล จะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในสถานะของเหลวและแก๊สง่ายขึ้น ตัวอย่างของแก๊สที่เกิดขึ้น เช่น แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นในปริมาณมาก แต่แก๊สไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ และแก๊สไฮโดรเจนจะมีปริมาณลดลง โดยอัตราเร็วในการเกิดแก๊สในชีวมวลแต่ละชนิดไม่แตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อน อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบการทดลอง

4. ขนาดของชีวมวล ขนาดของชีวมวลมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากขนาดของชีวมวลมีความสัมพันธ์กับอัตราการให้ความร้อน กล่าวคือการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่มีขนาดใหญ่จะเป็นไปได้ช้า ในขณะที่การให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่มีขนาดเล็กจะเป็นไปได้เร็วกว่า ซึ่งจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยได้ โดยเกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่จะเกิดในปริมาณที่น้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กได้รับความร้อนกระจายทั่วถึงและสม่ำเสมอ

5. ความดัน ความดันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยได้ กล่าวคือเมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยได้มีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าให้ความดันต่ำ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยได้เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การแตกตัวของชีวมวลจะเกิดได้ดีที่ความดันสูง ทำให้ได้แก๊สที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอน ในขณะที่ถ้าให้ความดันต่ำการแตกตัวของชีวมวลเป็นแก๊สจะลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำพวกของเหลวและถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น

6. เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในกระบวนการไพโรไลซิส เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในกระบวนการไพโรไลซิสต้องนานเพียงพอที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ หากเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในกระบวนการไพโรไลซิน้อยเกินไป การเปลี่ยนแปลงชีวมวลไปเป็นผลิตภัณฑ์ก็จะทำได้ไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าหากเวลาที่

เชื้อเพลิงอยู่ในกระบวนการไพโรไลซิสมากเกินไป จะทำให้ผลิตภัณฑ์จำพวกถ่านมีแนวโน้มของคาร์บอนในองค์ประกอบลดลงและผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยได้มีปริมาณลดลงด้วย

2.5.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

2.5.3.1 แก๊สไพโรไลซิส (Pyrolysis gas) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ซึ่งเกิดจากแก๊สที่ไม่ผ่านการควบแน่น เช่น แก๊สมีเทน (CH_4), แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สที่มีมวลโมเลกุลต่ำ โดยแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีค่าความร้อนประมาณ 7.5 เมกะจูลต่อลิตร ซึ่งค่าความร้อนนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการอบแห้ง หรือสามารถเป็นนำมาใช้เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2.5.3.2 น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil or Pyrolysis oil) ผลิตภัณฑ์ในส่วนของของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือสกัดเป็นสารเคมีได้ ซึ่งน้ำมันชีวภาพที่ได้นี้มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีดำ หรือสีน้ำตาลเข้ม หรือสีน้ำตาลแดงเข้ม ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่นำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส (Slow pyrolysis หรือ Fast pyrolysis) และค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ ประมาณ 17-19 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ค่าความร้อนจะอยู่ที่ประมาณ 42-44 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

2.5.3.3 ถ่านชาร์ (Charcoal) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งมีค่าความร้อนอยู่ที่ 20,082 เมกะจูลต่อกิโลกรัม หากพิจารณาในด้านสิ่งแวดล้อม ถ่านชาร์สามารถช่วยลดมลพิษจากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และสามารถนำไปผลิตเป็นวัตถุดิบต่าง ๆ เช่น ปุ๋ย ฉนวน ตัวดูดซับน้ำมัน ถ่านกัมมันต์ ที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ เป็นต้น [19]

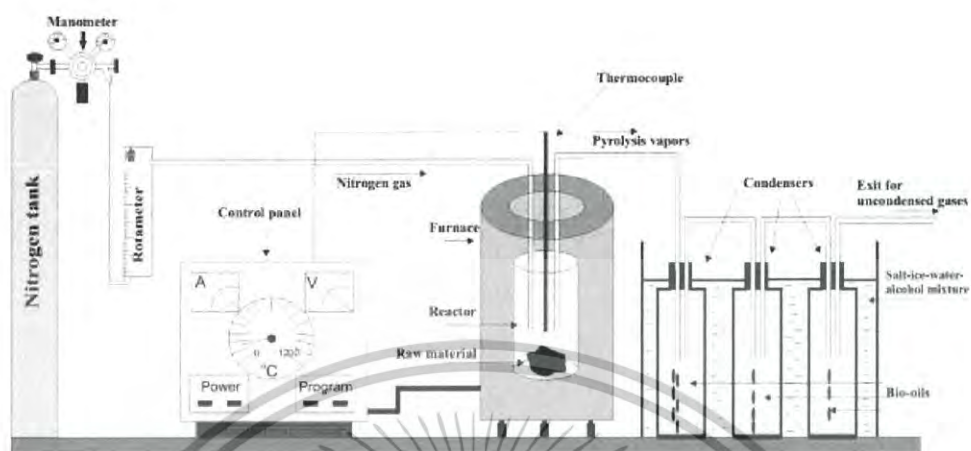
2.5.4 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส [18]

สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็น ชนิด ตามลักษณะองค์ประกอบและการทำงาน ได้แก่

(ก) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการออกแบบอย่างง่าย โดยให้มีการบรรจุชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ ชีวมวลจะไม่มีการเคลื่อนที่ขณะที่ถูกให้ความร้อนและกระทั่งเกิดการแตกตัวจนหมด สิ่งที่เคลื่อนที่ในปฏิกรณ์คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหลซึ่งไหลออกจากระบบได้ โดยการนำพาของแก๊สเฉื่อย ด้วยความดันภายในหรือด้วยการดูดออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นปฏิกรณ์อย่างง่ายที่สุด จึงนิยมใช้กันมากในระดับการทดลองของห้องปฏิบัติการ การทดสอบการเกิดผลิตภัณฑ์เบื้องต้นไม่ต้องใช้ชีวมวลในปริมาณมาก และข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้คือ ต้องมีการเปิดฝาของเครื่องปฏิกรณ์ทุกครั้งหลังจากที่ปฏิบัติการเสร็จแล้วครั้งหนึ่ง เพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์และป้อนวัตถุดิบชุดใหม่ลงไป เป็นครั้ง ๆ

ไป (Batch system) ดังนั้น ระบบการผลิตจึงเป็นในรูปแบบกึ่งต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องเท่านั้น (Batch or semi-continuous batch reactor system)



รูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactor) [15]

(ข) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบฟลูอิดซ์ (Fluidized Bed Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการออกแบบให้ชีวมวลเกิดการเคลื่อนที่ในระบบปฏิกรณ์แบบปั่นกววน (Turbulence) จนกระทั่งชีวมวลเหล่านั้นเกิดการแตกตัวจนหมด ชีวมวลที่ป้อนเข้าระบบจะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กพอที่จะสามารถเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนได้อย่างอิสระและใช้พลังงานในการทำให้เกิดการปั่นป่วนน้อย จากนั้นชีวมวลจะถูกป้อนเข้าระบบแบบเป็นครั้ง ๆ ตามปริมาณที่ต้องการ เมื่อชีวมวลเข้าถึงภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลของแก๊สตัวพาด้วยความเร็วสูงพอ ทำให้วัตถุดิบสามารถเคลื่อนตัวแบบปั่นป่วนได้ จากนั้นให้ความร้อนแก่ระบบจนกระทั่งชีวมวลแตกตัวหมด แล้วจึงจะป้อนชีวมวลอีกครั้งหนึ่ง การทำงานของระบบนี้จึงเป็นการทำงานแบบต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์สามารถแบ่งออกตามลักษณะการเคลื่อนตัวของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

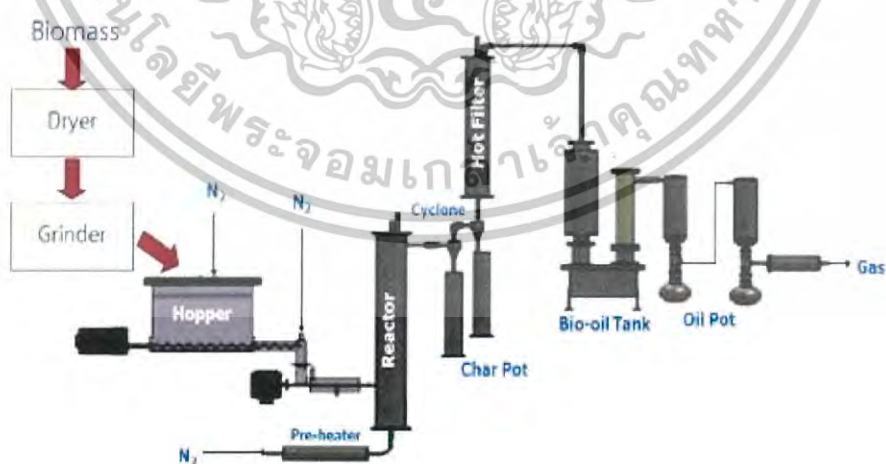
1. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสชนิดฟลูอิดซ์แบบฟองก๊าซ (Bubbling Fluidized Bed) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลของชีวมวลแบบปั่นป่วน ตามการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ การทำงานเริ่มจากการป้อนแก๊สที่เป็นตัวพาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับป้อนชีวมวล และ/หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปด้วย ความเร็วของแก๊สที่ใช้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของชีวมวลและแก๊ส แล้วทำให้ชีวมวลเกิดการเคลื่อนตัวแบบปั่นป่วน และเกิดการยกตัวขึ้นไปตามทิศทางการไหลของแก๊ส (ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นการเคลื่อนตัวขึ้นตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์) เกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนภายในระบบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งชีวมวลแตกตัวหมด ความเร็วของแก๊สที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคชีวมวลอย่างปั่นป่วน แต่จะต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้แก๊สนั้นพาเอาอนุภาคของแข็งไปอุดอยู่ตรงบริเวณทางออกของเครื่อง

ปฏิกรณ์ หรือพาเอาอนุภาคขนาดเล็กผ่านออกไปจากระบบ โดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ ได้แก่

1. สร้างและดำเนินงานง่าย
2. การควบคุมอุณหภูมิทำได้ดี
3. การถ่ายเทความร้อนสู่อนุภาคชีวมวลมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีการควบคุมของของแข็งสูง (High Solids Density) จึงสะดวกต่อการขยายกำลังการผลิต
4. การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ดีและให้ผลิตภัณฑ์ในสัดส่วนของของเหลวมาก โดยปกติอยู่ที่ 70-75% ของน้ำหนักชีวมวลแห้ง

และคุณลักษณะเฉพาะที่ดีที่ต้อคำนึงถึงในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบ Bubbling Fluidized Bed Reactor มีดังนี้

1. การให้ความร้อนสามารถทำได้หลายวิธี
2. เวลาการคงอยู่ของของแข็งและแก๊ส สามารถควบคุมได้โดยอัตราการไหลของ Fluidizing gas
3. ถ่านจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ที่ทำให้เกิดการแตกตัวในอนุกรมของปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังนั้นการแยกถ่านออกอย่างรวดเร็วและได้ผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งสำคัญ
4. ชีวมวลขนาดเล็ก จำเป็นต้องให้อัตราความร้อนที่สูง และขนาดของอนุภาคโดยทั่วไปต้องเล็กกว่า 2.2 มิลลิเมตร
5. การถ่ายเทความร้อนสู่เครื่องปฏิกรณ์ ต้องพิจารณาด้วยความรอบคอบ เนื่องจากขีดจำกัดในการขยายกำลังการผลิต



รูปที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสชนิดฟลูอิดไคซ์แบบฟองก๊าซ (Bubbling Fluidized Bed) [15]

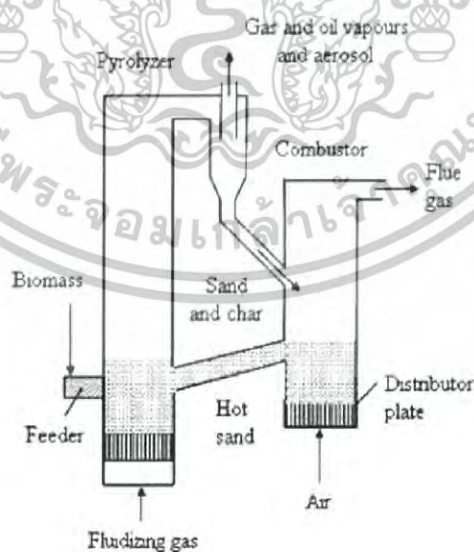
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสชนิดฟลูอิดไลซ์แบบไหลเวียน (Circulating Fluidized Bed) ดังรูปที่ 2.5 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลเวียนของชีวมวล และ/หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นป่วน การทำงานก็จะคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองแก๊ส คือมีการใช้แก๊สเป็นตัวนำพา แต่มีที่ต่างกันคือตรงที่มีการไหลเวียนของวัฏภาคของแข็ง ซึ่งในที่นี้หมายถึงตัวเร่งปฏิกิริยา

เครื่องปฏิกรณ์แบบ Circulating Fluidized Bed ได้รับความนิยมและได้รับการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ และโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งมีเฉพาะทรายที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled) ในขณะที่ถ่านซึ่งถูกแยกออกจะถูกเก็บรวมไว้ในอีกที่หนึ่ง เป็นการทำงานในรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์คู่ ถ่านจะมีการนำกลับมาใช้ใหม่และเผาไหม้ในเครื่องปฏิกรณ์ที่สอง เพื่อให้พลังงานแก่กระบวนการ โดยการนำทรายกลับมาใช้ใหม่ และคุณลักษณะเฉพาะขอเครื่องปฏิกรณ์แบบ Circulating Fluidized Bed มีดังนี้

1. การควบคุมอุณหภูมิสามารถทำได้ดี
2. เวลาการคงอยู่ของถ่าน มีความใกล้เคียงกับแก๊ส
3. เหมาะสมกับกำลังการผลิตขนาดใหญ่
4. เป็นเทคโนโลยีที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย
5. ถ่านสามารถแยกออกได้ด้วย Cyclone
6. การเผาไหม้ของถ่านในเครื่องปฏิกรณ์ที่สองต้องควบคุมอย่างใกล้ชิดและระมัดระวัง
7. การถ่ายเทความร้อนในระบบขนาดใหญ่ยังต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงต่อไปอีก

ผศ.ดร.วสันต์ เขียรสุวรรณ 2552



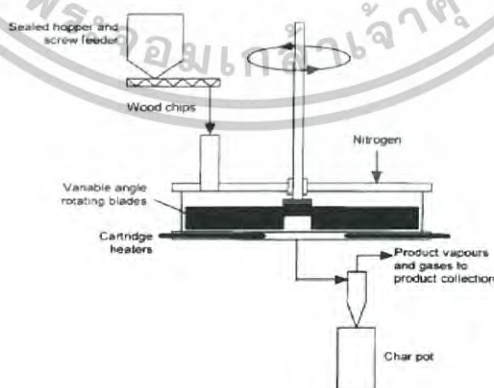
รูปที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสชนิดฟลูอิดไลซ์แบบไหลเวียน (Circulating Fluidized Bed) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) เครื่องปฏิกรณ์แบบให้ความร้อนด้วยการเสียดสี (Ablative Pyrolysis Reactor)

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดอื่น ๆ ทั้งหมด อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกกำหนดโดยการถ่ายเทความร้อนผ่านอนุภาคของชีวมวล ซึ่งเป็นสาเหตุที่ต้องทำให้ชีวมวลมีขนาดเล็ก ๆ ในเตาปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.6 ความร้อนจะถ่ายเทจากผนังของเครื่องปฏิกรณ์ที่ร้อนทำให้ชีวมวลหลอม ภายใต้ความดัน ในขณะที่เดียวกันจะเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดแก๊สด้วย และเป็นวิธีเดียวกันกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบอื่น ๆ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอิทธิพลของความดันเป็นอย่างมาก รวมถึงความเร็วสัมพัทธ์ของชีวมวลบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และอุณหภูมิผิวของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถใช้อุณหภูมิขนาดใหญ่ได้มากกว่าปฏิกรณ์แบบอื่น ๆ และไม่ต้องการแก๊สตัวพา ซึ่งทั้งสองเงื่อนไขทำให้ระบบมีต้นทุนต่ำกว่า โดยชีวมวลจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงกว่าเสียง (Supersonic) เพื่อให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์เกิดความดันสูง โดยอนุภาคที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนแก๊สและถ่านจะถูกนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีสัดส่วนผลผลิตที่ได้ประมาณ 60-65% โดยน้ำหนักของชีวมวลแห้ง และคุณสมบัติที่สำคัญของ Ablative Pyrolysis Reactor มีดังนี้

1. สามารถใช้กับชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ได้
2. ไม่ต้องใช้แก๊สตัวพา ดังนั้นอุปกรณ์ในกระบวนการจึงมีขนาดเล็ก
3. ชีตจำกัดของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์มากกว่าอัตราการดูดซับความร้อนของชีวมวลเหมือนในเครื่องปฏิกรณ์แบบอื่น ๆ
4. อัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกจำกัดโดยการถ่ายเทความร้อนสู่เครื่องปฏิกรณ์ ไม่ใช่ชีวมวล
5. กระบวนการทั้งหมดขึ้นอยู่กับ การควบคุมพื้นที่ผิว การขยายกำลังการผลิตจึงแพงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบอื่น ๆ

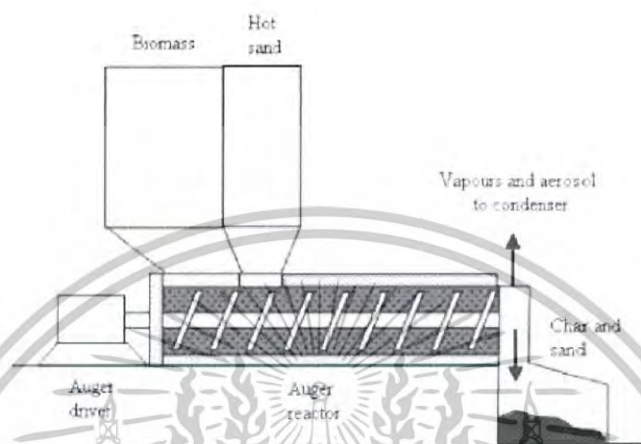


รูปที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบให้ความร้อนด้วยการเสียดสี (Ablative Pyrolysis Reactor) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ง) เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger Reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ได้ใช้แก๊สเป็นตัวพาและใช้อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส โดยเครื่องปฏิกรณ์นี้จะทำงานแบบต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ดังรูปที่ 2.7



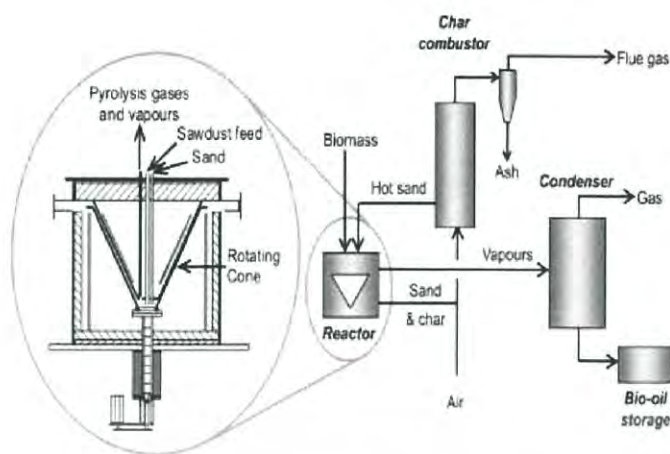
รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger Reactor) [15]

(จ) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบกรวยหมุน (Rotating Cone Pyrolysis Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบกรวยหมุน (Rotating cone reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดกรวยหมุนแบบการส่งถ่าย (Transported bed reactor) ดังรูปที่ 2.8 โดยเกิดจากแรงเหวี่ยง มีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ

1. แรงเหวี่ยงทำให้ความร้อนและชีวมวลไหลขึ้นไปในกรวยหมุนที่ร้อน
2. แก๊สจะถูกเก็บรวบรวมและผ่านกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป
3. ในระบบนี้จะมีความต้องการแก๊สตัวพาในเครื่องปฏิกรณ์น้อยกว่าระบบ Fluidized bed reactor มาก
4. ผลรวมของการทำงานของ 3 ระบบย่อย ประกอบด้วย ปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน อุปกรณ์เผาไหม้ถ่านแบบ Bubbling bed reactor และ Riser สำหรับการนำทรายกลับมาใช้ใหม่
5. สัดส่วนของผลผลิตจำพวกของเหลวที่ได้ประมาณ 60-70% ของน้ำหนักชีวมวลแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



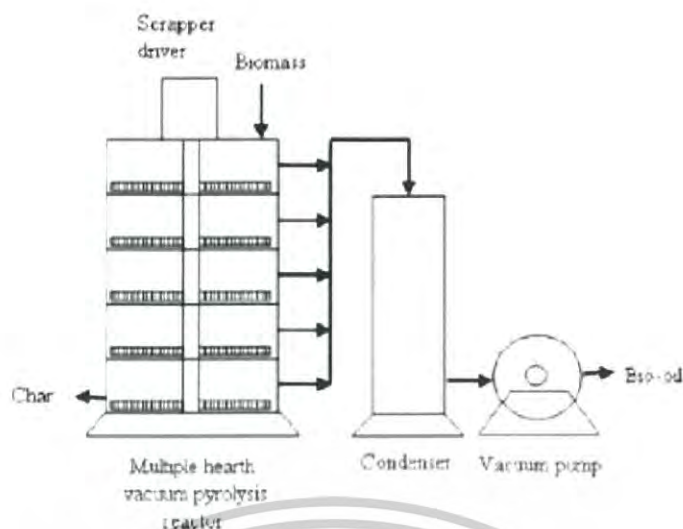
รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบกรวยหมุน (Rotating Cone Pyrolysis Reactor) [15]

(จ) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum Pyrolysis Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum Pyrolysis Reactor) ดังรูปที่ 2.9 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการสลายตัวของชีวมวล ภายใต้การลดความดันและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์นาน ซึ่งไม่เหมือนกับการไพโรไลซิสแบบเร็ว เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเป็นแก๊สกับกรณีของการไพโรไลซิสแบบเร็วแล้ว จะเกิดได้เร็วเหมือนกัน และคุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์นี้ คือ

1. สามารถใช้กับอนุภาคของชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ได้
2. ปริมาณถ่านในของเหลวน้อยกว่า เนื่องจากความเร็วของแก๊สต่ำกว่า
3. ไม่ต้องใช้แก๊สตัวพา (Carrier gas)
4. สัดส่วนของเหลวที่ได้ประมาณ 35-50% โดยน้ำหนักแห้งของชีวมวล ซึ่งมีสัดส่วนสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเร็วแบบอื่น ๆ
5. กระบวนการเชิงกลมีวิธีการที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum Pyrolysis Reactor) [15]

2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งได้นำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยและเป็นรากฐานของการออกแบบชนิดอื่น ๆ ที่มีความสำคัญอย่างมากในทางปฏิบัติ

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ ปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น คนงาน หรือเครื่องจักร เป็นต้น และใน 2 ระดับนี้จะแทนด้วยระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่ง ๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้น ๆ ก็ได้ ในการทดลองซ้ำ 1 ครั้งจะมีความสมบูรณ์สำหรับการออกแบบของระบบเช่นนี้ ต้องประกอบไปด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล โดยเรียกรูปแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งมีประโยชน์ต่อการทดลองมากในช่วงเริ่มแรก เนื่องจากมีปัจจัยจำนวนมากที่ต้องการจะถูกตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ปัจจัยได้อย่างสมบูรณ์

การออกแบบ 2^k ที่ถูกนำมาใช้ในสหกิจศึกษานี้ คือ การออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ในที่นี้จะแทนด้วย A และ B ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ จึงเรียกรูปแบบชนิดนี้ว่าเป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” ตัวอย่างเช่น พิจารณาการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเคมีและจำนวนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของสารเคมีเป็นปัจจัย A ซึ่งประกอบด้วย 2 ระดับ คือ 15% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

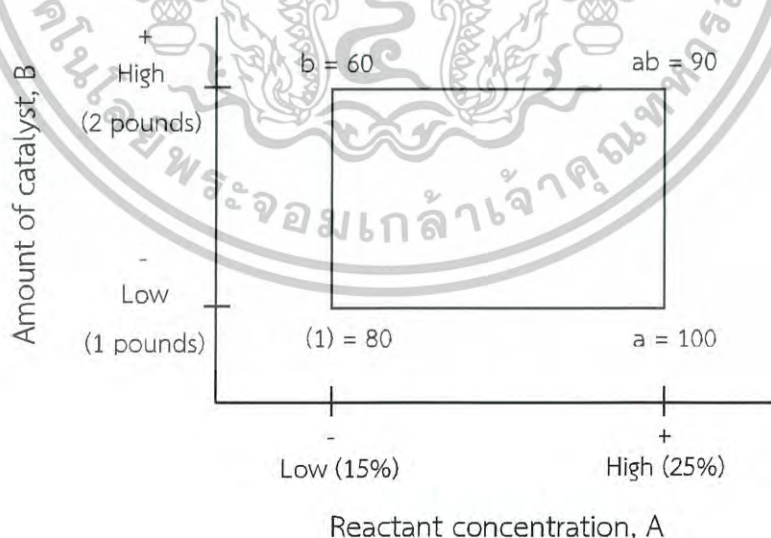
และ 25% และให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัย B ซึ่งมีระดับอยู่ที่ 1 และ 2 ปอนด์ ตามลำดับ ทำการทดลองนี้จำนวน 3 เพลทเคทหรือทำซ้ำ 3 ครั้ง และได้ข้อมูลดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงข้อมูลของความเข้มข้นและจำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองที่มีการทำซ้ำ 3 ครั้ง

Factor		Treatment	Replicate			Total
A	B	Combination	I	II	III	
-	-	A low, B low	28	25	27	80
+	-	A high, B low	36	32	32	100
-	+	A low, B high	18	19	23	60
+	+	A high, B high	31	30	29	90

ที่มา ; การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (2545)

การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 โดยให้ A แทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูง จะแทนด้วยเครื่องหมาย - และ + บนแกน A และ B ตามลำดับ ดังนั้นเครื่องหมาย - บนแกน A แทนระดับความเข้มข้นต่ำ (15%) และ + แทนระดับสูง (25%) ส่วนบนแกน B เครื่องหมาย - แทนด้วยระดับต่ำของตัวเร่งปฏิกิริยา และ + แทนด้วยระดับสูงตามลำดับ



รูปที่ 2.10 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 สำหรับการออกแบบนี้จะแทนด้วยอักษรตัวเล็ก ซึ่งเห็นได้ว่า สำหรับระดับสูงของปัจจัยใด ๆ จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น และปัจจัยที่เกิดขึ้นสำหรับ ระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใด ๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้นการออกแบบ 2^k ในตัวอย่างนี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูง และ B ที่ระดับต่ำ, b แทนการทดลองร่วม ปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับต่ำ และ B ที่ระดับสูง, ab แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1) แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิญฐ์ สุตสุข และ ศิริภัสสร เกียรติพงษ์พร [26] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของใยผลปาล์ม เปลือกเมล็ดกาแฟ และไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจนเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของการเหลวสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 47.2 โดยน้ำหนัก แก๊ส และถ่านเท่ากับร้อยละ 23.0 และ 29.8 โดยน้ำหนักตามลำดับ ในขณะที่เปลือกเมล็ดกาแฟ ให้ ผลิตภัณฑ์ในส่วนของการเหลว แก๊สและถ่านเท่ากับร้อยละ 42.8, 25.1 และ 32.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และใยผลปาล์มให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของการเหลว แก๊สและถ่านเท่ากับร้อยละ 39.8, 26.7 และ 33.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อนำชีวมวลทั้ง 3 ชนิดไปหาค่าความร้อนโดยใช้เครื่องมือ บอมบ์ แคลอรีมิเตอร์ หากเทียบค่าความร้อนของวัฏภาคน้ำมันในปริมาณของน้ำหนักชีวมวลที่เท่ากัน ผลที่ได้ คือ ใยผลปาล์มและไม้ยูคาลิปตัสมีค่าความร้อนเท่ากันคือ 4.26 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของชีวมวล ส่วน เปลือกเมล็ดกาแฟให้ค่าความร้อนน้อยที่สุดคือ 4.17 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของชีวมวล และจากผลการ กลั่นแยกส่วนประกอบของน้ำมัน เมื่อเทียบปริมาณของแก๊สโซลีนต่อน้ำหนักของชีวมวลที่เท่ากัน พบว่าปริมาณแก๊สโซลีนที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสนั้นมากที่สุดคือ 0.410 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมของชีวมวล ดังนั้นในการเปรียบเทียบชีวมวลทั้ง 3 ชนิด พบว่าไม้ยูคาลิปตัสเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกใหม่

Patrick J. McNamara et al. [27] ศึกษาร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำในมิลวอกี (Milwaukee Metropolitan Sewerage district) เมืองวิสคอนซิน (Wisconsin) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) เพราะเครื่องปฏิกรณ์ชนิด นี้มีความเหมาะสมในระดับการทดลอง ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ทำจากสแตนเลสสตีล มีความสูง 25.4 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.89 เซนติเมตร ในการทดลองมีช่วงอุณหภูมิอยู่ที่ 300-800 องศา เซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจนเท่ากับ 30 มิลลิลิตรต่อนาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อแก๊สร้อนผ่านไป ไม่ผ่านการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังอุปกรณ์ควบแน่นหรือคอนเดนเซอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบแน่นผ่านคอนเดนเซอร์ ได้เป็น น้ำมันชีวภาพ (Pyrolysis-oil) ส่วนแก๊ส (Pyrolysis gas) ที่ไม่ได้ควบแน่นเป็นของเหลว จะถูกเก็บไว้ในถุงเก็บแก๊ส (Bag for gas collection) จากนั้นนำแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) พบว่าองค์ประกอบของแก๊สส่วนใหญ่ คือ แก๊สมีเทน แก๊สอีเทน แก๊ส นอร์มอลเพนเทน และแก๊สไอโซเพนเทน เป็นต้น ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นแก๊สเท่ากับ 9.8% โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์เท่ากับ 40.5% โดยน้ำหนัก และน้ำมันชีวภาพเท่ากับ 49.7% โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะในการทดลองที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

M.U. Garba et al. [28] ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ชานอ้อย โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) ช่วงอุณหภูมิในการทดลองอยู่ที่ 400-600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ HZSM-5 พบว่าในกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพเท่ากับร้อยละ 49.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด แก๊สและถ่านเท่ากับร้อยละ 19.5 และ 31.1 โดยน้ำหนักตามลำดับ หากทำการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ 400 และ 600 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพ แก๊สและถ่านเท่ากับ ร้อยละ 38.2, 15.3 และ 46.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพ แก๊สและถ่านเท่ากับร้อยละ 39.6, 26.5 และ 33.9 โดยน้ำหนัก และในกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักตามลำดับ ลงไปผสมกับชานอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ที่ 500 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพมีร้อยละผลผลิตเท่ากับร้อยละ 49.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด แก๊สและถ่านเท่ากับร้อยละ 18.5 และ 31.8 โดยน้ำหนักตามลำดับ หากทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพที่ได้เท่ากับร้อยละ 41.5 และ 21.1 โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณากับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพที่ได้นั้นต่างกัน อย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อนำน้ำมันชีวภาพไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) หากพิจารณาปริมาณกรดฟีนอลิก (Phenolic) และกรดโอเลอิก (Oleic acid) พบว่าในการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีกรดฟีนอลิกในปริมาณมากและกรดโอเลอิกในปริมาณที่น้อยกว่าการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีประสิทธิภาพในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมากกว่า

Javier Abrego et al. [29] ศึกษาความแตกต่างของโครงสร้างกาทะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากการผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียนี้ ซึ่งกากตะกอนน้ำเสียได้รับจากเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันวิจัย Instituto de Carboquímica (CSIC) ประเทศสเปน เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) พบว่ามีปริมาณความชื้น (Moisture) ร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก ชี้อา (Ash) ร้อยละ 26.0 โดยน้ำหนัก สารที่สามารถระเหยได้ง่าย (Volatiles) ร้อยละ 64.6 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) ร้อยละ 8.7 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาบดและคัดขนาดให้มีขนาด 150-250 ไมโครเมตร ชั่งกากตะกอนน้ำเสีย 2.5 กรัม บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) ทำจากสแตนเลสสตีล ความสูง 32 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ 300-900 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อนำกากตะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์ (C900 Char) มาวิเคราะห์รูปร่างหรือสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, SEM-EDX) พบว่าถ่านชาร์ มีคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) และเหล็ก (Fe) เป็นธาตุองค์ประกอบ ซึ่งสัณฐานวิทยาของทั้งกากตะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์มีขนาดรูปร่างที่หลากหลาย การจัดเรียงตัวกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยที่ถ่านชาร์มีลักษณะเป็นโครงตาข่ายและมีรูพรุน เป็นผลมาจากการแตกตัวของกากตะกอนน้ำเสียไปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

M.Rehan et al. [30] ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพอลิสไตรีน (Polystyrene) โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ซีโอไลต์ (Zeolite) ทั้งแบบสังเคราะห์ (Synthetic zeolite) และแบบไม่สังเคราะห์ (Natural zeolite) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในแต่ละการทดลองซึ่งพอลิสไตรีน 1 กิโลกรัม ส่วนการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซิงซีโอไลต์ทั้ง 2 แบบรวมกัน 100 กรัม บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) ซึ่งมีความสูงเท่ากับ 36 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 31 เซนติเมตร ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 450-900 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าในการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพที่ได้เท่ากับร้อยละ 80.8 กรัมโดยน้ำหนัก แก๊สเท่ากับร้อยละ 13 กรัมโดยน้ำหนัก และถ่านเท่ากับร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก ในการทดลองที่ใช้ซีโอไลต์แบบไม่สังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของเหลว แก๊ส และถ่านที่ได้เท่ากับ 54, 12.8 และ 32.8 โดยน้ำหนักตามลำดับ ส่วนการทดลองที่ใช้ซีโอไลต์แบบสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของเหลว แก๊ส และถ่านที่ได้เท่ากับ 50, 22.6 และ 27.4 โดยน้ำหนักตามลำดับ หากพิจารณาในการทดลองที่ใช้ซีโอไลต์แบบสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของเหลวที่ได้้นั้นมากกว่าในการทดลองที่ใช้ซีโอไลต์แบบไม่สังเคราะห์ เนื่องจากโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์แบบสังเคราะห์นั้นมากกว่าซีโอไลต์แบบไม่สังเคราะห์ นอกจากนี้กระบวนการแตกตัวของซีโอไลต์ยังทำให้ความเป็นกรดสูงอีกด้วย ดังนั้นร้อยละผลผลิตของแก๊สที่ได้จึงมากและของเหลวที่ได้จึงน้อย ขณะที่การทดลองที่ใช้ซีโอไลต์แบบไม่สังเคราะห์ ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นถ่านนั้นมีปริมาณมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ในส่วน ของเหลวมาก

ที่สุด แต่ยังไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันก่อน เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำมันยังไม่มีควมบริสุทธิ์ (Impurity) และปริมาณของสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic) นั้นมีมากถึงร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก

Neelanjan Bhattacharjee [31] ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของพีชน้ำและถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพีชน้ำที่อุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าพีชน้ำและถ่านชาร์มีลักษณะความเป็นรูพรุนที่ต่างกัน เนื่องจากเกิดการแตกตัวของโครงสร้างไปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยถ่านชาร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 4.83 และ 11.64 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนนั้นมีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ร้อยละผลผลิตที่เป็นของเหลว ในสภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสนั้นมีปริมาณมากกว่าอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นั้นมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่และการแตกตัวของโครงสร้างมากกว่า ซึ่งการแตกตัวของโครงสร้างนี้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

1. กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตีเคมికอล จำกัด
2. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 96% ขนาด 2500 มิลลิลิตร เกรดคุณภาพ วิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS ประเทศสเปน
3. อะซิโตน (CH_3OCH_3) เกรดคุณภาพวิเคราะห์ ขนาด 2500 มิลลิลิตร เกรดคุณภาพ วิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS ประเทศสเปน
4. เอทานอล (C_2H_5OH) เกรดคุณภาพวิเคราะห์ ขนาด 2500 มิลลิลิตร เกรดคุณภาพ วิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS ประเทศสเปน
5. โยแก้ว (Glass wool) ขนาด 500 กรัม บริษัท Chem-Supply Pty, Ltd. ประเทศออสเตรเลีย
6. ทรายควอตซ์ (SiO_2) ขนาด 500 กรัม บริษัท Wako Pure Chemical Industries, Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ปีกเกอร์แก้ว ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
2. ขวดเก็บสารขนาดเล็กฝาดำ (Vial, Black lid) จำนวน 32 ขวด
3. ถุงเก็บแก๊ส (Gas sampling bag) จำนวน 8 ถุง
4. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร (Erlenmeyer flask)
5. ซ้อนตักสาร
6. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
7. โถดูดความชื้น
8. ครกและสาก
9. ลูกยางดูดปิเปต (Rubber for pipette)
10. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Yamato บริษัท YAMATO SCIENTIFICCO., LTD. ประเทศญี่ปุ่น
11. ปากคีบ (Forcep)

12. ม้วนเทปพาราฟิล์ม (Parafilm) ขนาด 4 นิ้ว x 125 ฟุต บริษัท BEMIS FLEXIBLE PACKAGING ประเทศสหรัฐอเมริกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขของบริษัทฯ ไม่สามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการค้าหรือการวิจัยอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ

13. ประแจแหวนข้างปากตาย (Combination wrench) ขนาด 15, 19, 24, 27 และ 30 มิลลิเมตร
14. ขาตั้งและแคลมป์ (Stand and clamp)
15. เตาเผา TUBULAR FURNACE MODEL CTF12/75/700/201
16. Tube furnace MODEL CTF ยี่ห้อ CARBOLITE
17. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ BINDER model – FD115
18. เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor) รุ่น FBR 60
19. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)
20. Bomb calorimeter Parr1341
21. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (Gas Chromatography – Flame Ionization Detector or GC-FID) สำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของแก๊ส ยี่ห้อ ALLCONS รุ่น CP 3800
22. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) สำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของของเหลว ยี่ห้อ Chrompack รุ่น CP 9002

3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้ดังนี้

3.2.1 การเตรียมกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรมและการวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอนน้ำเสีย

3.2.2 การไฟโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor)

3.2.3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฟโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

3.2.1 การเตรียมกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรมและการวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอนน้ำเสีย

3.2.1.1 การเตรียมกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้ เคมีคอล จำกัด

1. นำกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้ เคมีคอล จำกัด มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 กากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. บดกากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการอบให้แห้งแล้วให้มีขนาดเล็กลง ด้วยครกและสาก ดังรูป
ที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ครกและสากที่ใช้บดกากตะกอนน้ำเสีย

3. แบ่งกากตะกอนน้ำเสียออกเป็น 2 ส่วน โดยกากตะกอนน้ำเสียส่วนแรกจะไม่ทำการคัดขนาด และกากตะกอนน้ำเสียส่วนที่สองจะทำการคัดขนาด ด้วยตะแกรงร่อน ให้มีขนาดอยู่ในช่วง 500-850 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ตะแกรงร่อนกากตะกอนน้ำเสียให้มีขนาดอยู่ในช่วง 500-850 ไมโครเมตร

3.2.1.2 การวิเคราะห์สมบัติกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูยสเปเชียลตีเคมีคอล จำกัด

การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูยสเปเชียลตีเคมีคอล จำกัด ที่มีขนาด 500 ไมโครเมตร ซึ่งผ่านการอบแห้งมาแล้ว โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ดังนี้

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของกากตะกอนน้ำเสียด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) โดยทำการตรวจวิเคราะห์ที่กำลังขยาย 2500 และ 5000 เท่า



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectroscopy; SEM-EDS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนกากตะกอนน้ำเสียที่ไม่ผ่านการคัดแยกขนาด ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่ได้ดังต่อไปนี้

2. วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ (Proximate analysis) ด้วย

2.1 เตาเผา TUBULAR FURNACE MODEL CTF12/75/700/201

2.2 Tube furnace MODEL CTF ยี่ห้อ CARBOLITE

2.3 ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ BINDER model – FD115

3. วิเคราะห์หาค่าความร้อนของกากตะกอนน้ำเสีย (Heating value) ด้วยเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน Bomb calorimeter Parr 1341

3.3.1 การไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor)

1. ใช้ปากคีบ (Forcep) คีบใยแก้ว (Glass wool) บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ แล้วใช้เหล็กแท่งดันใยแก้วลงไปภายในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.5 เหล็กแท่งที่ดันใยแก้วลงไปภายในเครื่องปฏิกรณ์

2. ชั่งทรายควอตซ์ (SiO_2) และกากตะกอนน้ำเสียที่มีขนาดอยู่ในช่วง 500-850 ไมโครเมตร ซึ่งผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร้อนให้มีน้ำหนักอย่างละประมาณ 0.5 กรัม ผสมให้ทรายควอตซ์กระจายไปทั่ว ๆ กากตะกอนน้ำเสีย ดังรูปที่ 3.6 แล้วบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่และคีบใยแก้วปิดทับด้านบนตามลงไปอีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ทรายควอตซ์ที่กระจายไปทั่ว ๆ กากตะกอนน้ำเสีย

3. ชั้นอุปกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ให้แน่นด้วยประแจแหวนข้างปากตายขนาด 15, 24 และ 27 มิลลิเมตร

4. ชั้นอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็น (Ice trap) ให้แน่นด้วยประแจแหวนข้างปากตายขนาด 27 และ 30 มิลลิเมตร แล้วต่อชุดอุปกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน พร้อมทั้งใส่ น้ำแข็งในอ่างน้ำเย็น



รูปที่ 3.7 ประแจแหวนข้างปากตายขนาด 27 และ 30 มิลลิเมตร ชั้นอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็น

5. เสียบปลั๊กแล้วเปิดเครื่องควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตคองที่ (Main switch) จากนั้น ตั้งค่าอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ตามที่กำหนดไว้ นั่นคือ 400 และ 500 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองแต่ละครั้งสามารถทำได้เพียงครั้งละอุณหภูมิเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตคองที่ (Main switch)



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการตั้งค่าอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ที่ 500 องศาเซลเซียส

6. เปิดวาล์วถังแก๊สไนโตรเจน เพื่อตรวจสอบว่าการรั่วไหล (Leakage) ของแก๊สหรือไม่ โดยสังเกตที่ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุน้ำอยู่ ซึ่งจะเชื่อมต่อกับสายยางที่เป็นทางผ่านของแก๊สจากถังแก๊สมายังขวดรูปชมพู่ หากเปิดแก๊สแล้วเกิดฟองแก๊สขึ้น แสดงว่าแก๊สไม่เกิดการรั่วไหล แต่ถ้าหากเปิดแก๊สแล้วไม่เกิดฟองแก๊สในขวดรูปชมพู่ แสดงว่าแก๊สเกิดการรั่วไหล เพราะฉะนั้นจะต้องขันอุปกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยประแจให้แน่นอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนกระทั่งแก๊สไม่เกิดการรั่วไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ขวดรูปชมพู่เชื่อมต่อกับสายยางที่เป็นทางผ่านของแก๊สจากถังแก๊ส

7. เปิดอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Glass tube rotameter, RT 1) ตามค่าที่กำหนดไว้ คือ 20 และ 40 มิลลิลิตรต่อนาที โดยในการทดลองแต่ละครั้งสามารถทำได้เพียงครั้งละอัตราการไหลเดียวเช่นกัน



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Glass tube rotameter, RT 1)

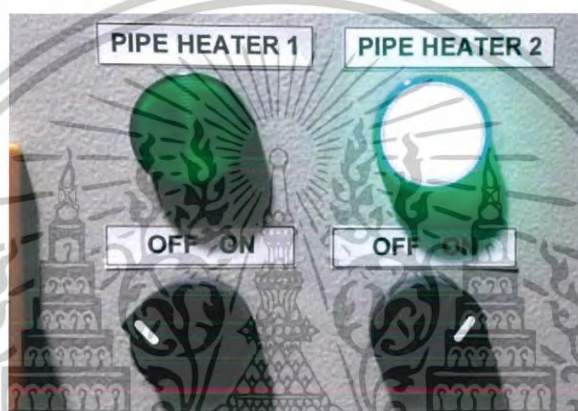
8. ตรวจสอบอัตราการไหลของแก๊สอีกครั้ง โดยบีบลูกยางคูดิปิเปต (Rubber for pipette) ที่บรรจุน้ำสบู่ ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์วัดปริมาตร จับเวลาขณะฟองสบู่เคลื่อนที่ขึ้นไป 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 วินาที นั่นคือ มีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ถ้าหากฟองสบู่เคลื่อนที่ขึ้นไป 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 7.5 วินาที นั่นคือ มีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที

9. เปิดสวิตช์อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ (Furnace 2) และท่อนำความร้อน (Pipe heat 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



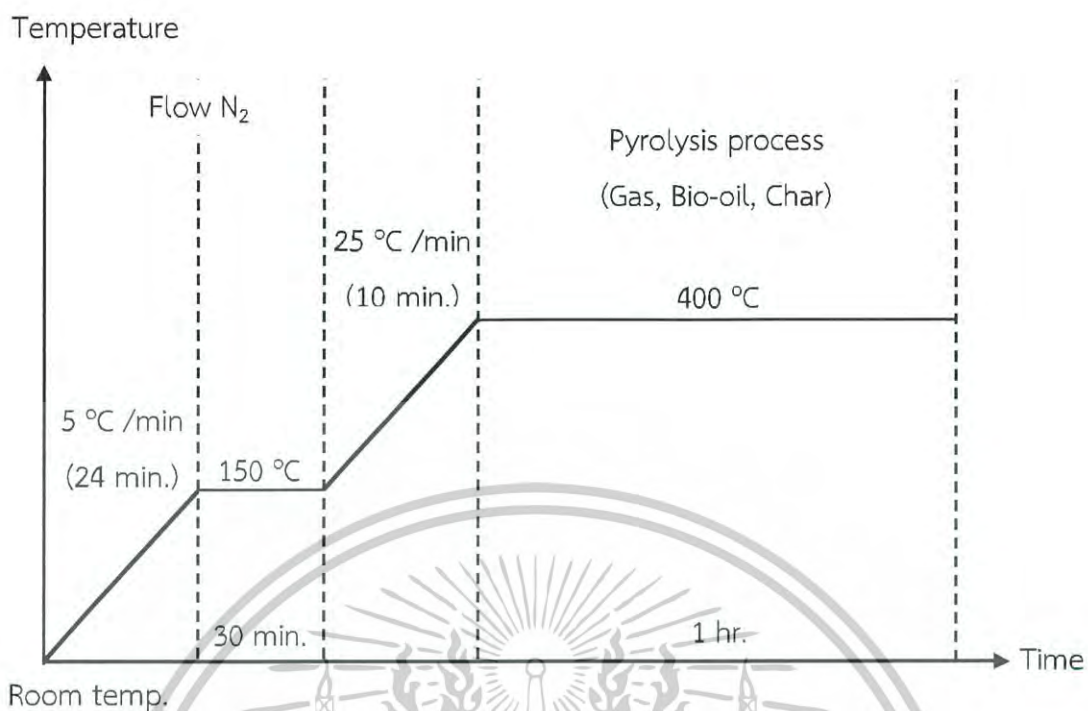
รูปที่ 3.12 สวิตซ์อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ (Furnace 2)



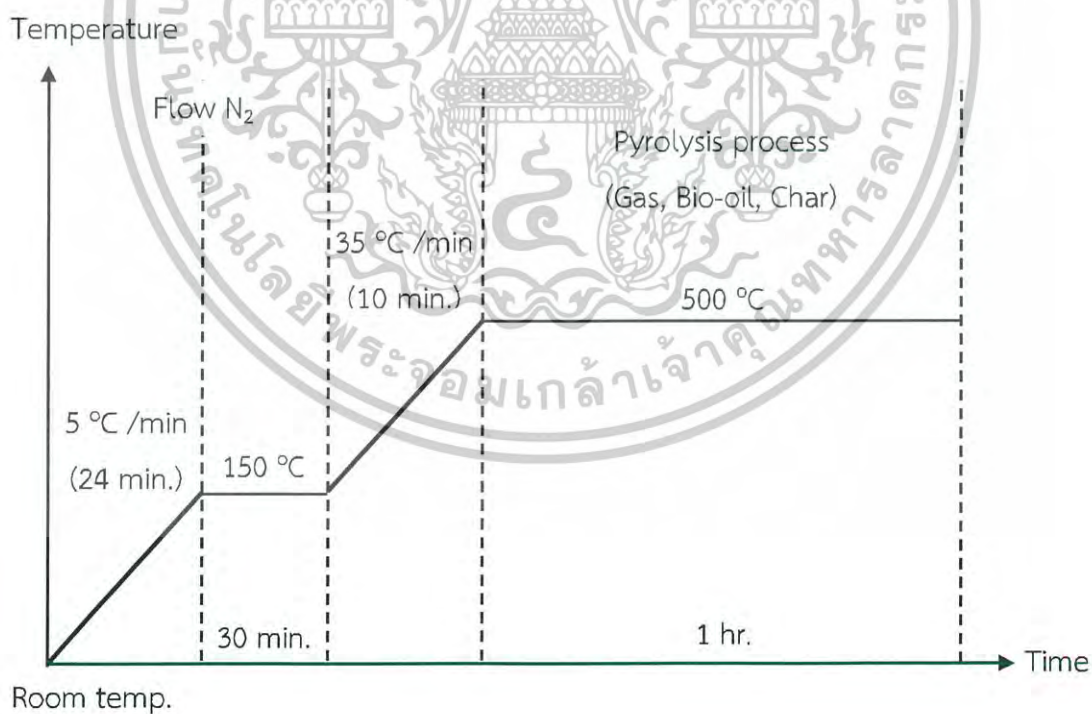
รูปที่ 3.13 สวิตซ์อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่นำความร้อน (Pipe heat 2)

10. กดปุ่ม set และ เครื่องหมาย \wedge พร้อมกันเพื่อเริ่มให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงาน แล้วรอให้อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ในตอนแรก คือ 400 หรือ 500 องศาเซลเซียส
11. ต่อดึงเก็บแก๊ส (Gas sampling bag) แล้วรอเครื่องปฏิกรณ์ทำงานจนกระทั่งครบ 1 ชั่วโมงจากนั้นอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์จะลดลงไปจนถึงอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. เก็บผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ แก๊ส และถ่านชาร์

- น้ำมันชีวภาพ เปิดอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็น (Ice trap) ด้วยประแจแหวนข้างปากตาย ขนาด 27 และ 30 มิลลิเมตร แล้วเทออกใส่ขวดเก็บสารขนาดเล็กฝาดำ (Vial, Black lid) พันด้วยพาราฟิล์มเทป (Parafilm tap) จากนั้นชั่งน้ำหนักเพื่อหาละยะผลผลิตที่ได้ (% yield) ถ้าหากได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวในปริมาณน้อย จะใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย

$$\% \text{ Yield น้ำมันชีวภาพ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำมันชีวภาพที่ได้}}{\text{น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย}} \times 100$$

- ถ่านชาร์ (Charcoal) เปิดอุปกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยประแจแหวนข้างปากตาย ขนาด 24 และ 27 มิลลิเมตร คีบใยแก้วที่อยู่ด้านบนออก เทของแข็งที่อยู่ภายในอุปกรณ์ออก แล้วเก็บใส่ถุงซิปล็อค (Zipper bag) จากนั้นชั่งน้ำหนักเพื่อหาละยะผลผลิตที่ได้ (% yield)

$$\% \text{ Yield ถ่านชาร์} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งหลังไพโรไลซิส} - \text{น้ำหนักทรายควอตซ์}}{\text{น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย}} \times 100$$

- แก๊ส เก็บถุงเก็บแก๊สที่ต่ออยู่กับเครื่องปฏิกรณ์ แล้วพันด้วยพาราฟิล์มเทป
 $\% \text{ Yield แก๊ส} = 100 - [(\% \text{ Yield ของเหลว}) + (\% \text{ Yield ของแข็ง})]$

3.2.3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

3.2.3.1 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในส่วนของของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

1. แบ่งผลิตภัณฑ์ในส่วนของของเหลวที่บรรจุอยู่ในขวดเก็บสารขนาดเล็กฝาดำ (Vial, Black lid) มา 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ที่มีความเข้มข้น 96% อีก 0.5 มิลลิลิตร ในขวดเก็บสารขนาดเล็กฝาดำขวดใหม่ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) แล้วศึกษาปริมาณสารกลุ่มพาราฟิน (Paraffin) และโอเลฟิน (Olefin) ที่เกิดขึ้น จากนั้นพันขวดเก็บสารด้วยเทปพาราฟิล์ม (Parafilm tap) ทำเช่นนี้จนกระทั่งครบทุกสถานะที่ทำการทดลอง

2. เปิดแก๊สไนโตรเจน (N_2), อากาศ (Air zero) และ แก๊สไฮโดรเจน (H_2)

3. นำขวดเก็บสารทุกขวดทั้งที่เป็นผลิตภัณฑ์โดยตรงและผลิตภัณฑ์ที่นำมาผสมกับกรด

ซัลฟิวริกมาใส่ช่องเตรียมวิเคราะห์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ดังรูปที่ 3.16 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้บนเว็บไซต์ของงานวิจัยนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 3.16 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ช่องใส่ขวดเตรียมวิเคราะห์สารของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ของเหลว

4. เปิดสวิตช์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของของเหลว ยี่ห้อ Chrompack รุ่น CP 9002 ดังรูปที่ 3.17 แล้วทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 กดที่จอยมอเนเตอร์ Page 5 > Enter > Line 2 > Enter > กด 1 นั่นคือ method ที่ 1 > Enter

4.2 Page 8 > Enter > line 1 เพื่อกรอกข้อมูลจำนวนขวดเก็บสารที่ใช้วิเคราะห์ > กด 1 (First vial) > Enter > กด 1 > Enter > กดตัวเลขตามจำนวนของขวดเก็บสารที่นำมาวิเคราะห์ (Last vial) > Enter > กด 1 คือ method ที่ 1 > Enter

4.3 จุด Flame โดยดันสวิตช์ที่ช่อง Electronic Pressure Control ของ Channal A มาฝั่ง On ค้างไว้ประมาณ 10 วินาที ถ้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมทำงาน สวิตช์ Start จะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียว

5. เปิดคอมพิวเตอร์และเข้าโปรแกรม Maestro Chromatography Data System Version 2.4 > OK

5.1 ไปที่ Serial CP 900x ใส่ Username : demo แล้ว Log in เข้าสู่ระบบ

5.2 File > New Batch แล้วกรอกข้อมูลตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม Mestro 2.4

Simple ID	Method	Run type	File name
ตั้งชื่อตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์	Test.met	Unknow	Test.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่ควรดัดแปลงไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
5.3 File > Save Batch As > แล้วตั้งชื่อ file โดยมีนามสกุลเป็น .seq > Run Batch
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กด Start ที่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แล้วรอ Chromatogram ปรากฏขึ้นบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เมื่อครบเวลาที่เครื่องวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของของเหลวทุกขวดเรียบร้อยแล้ว สามารถ cool down เครื่องได้ดังนี้

6.1 กดที่จอมอนิเตอร์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Page 5 > Enter > line 2 > Enter > กด 2 > Enter

6.2 รอให้อุณหภูมิของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีในส่วนของคอลัมน์ (Column) ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส และ Detector ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส จึงสามารถปิดเครื่องได้

7. สามารถพิมพ์รายงานผลที่ได้โดยไปที่ Analyze ซึ่งโปรแกรมจะสามารถบอกถึงปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแต่ละตัวที่มีคาร์บอนตั้งแต่ C_8 ไปจนถึง C_{31} ที่เกิดขึ้น แล้วรายงานผลเป็นร้อยละของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน C_8 ถึง C_{31} ที่เกิดขึ้นทั้งหมด > Print Report



รูปที่ 3.17 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของของเหลว

3.2.3.2 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

1. เปิดแก๊สไนโตรเจน (N_2), อากาศ (Air zero), แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สฮีเลียม (He)
2. เปิดสวิตช์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของแก๊ส ยี่ห้อ ALLCONS รุ่น CP 3800 ดังรูปที่ 3.18 แล้วทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

กดที่ Detector > เลื่อนมาที่ Middle FID > Enter > Ignite

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปิดคอมพิวเตอร์ เข้าโปรแกรม System Control GC 3800 แล้วทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 File > Activate method > test condition 2 Off > Open



3.2 รอให้สัญญาณอุณหภูมิเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียวทั้งหมด > test condition 2 On > Open > รอให้สัญญาณอุณหภูมิเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียวทั้งหมดและหน้าจอแสดง Chromatogram จะ reset เพื่อพร้อมทำงาน

4. ต่อกุ๊เก็บแก๊ส (Gas sampling bag) กับวาล์วที่ต่อเข้ากับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จากนั้นกดไปที่ Injection port 1 ครั้ง แล้วรอ Chromatogram ปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

5. เมื่อครบเวลาที่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีวิเคราะห์ธาตุจบแล้ว ให้รอ cool down โดยสังเกตที่สัญญาณอุณหภูมิตั้งบนหน้าจอคอมพิวเตอร์เปลี่ยนเป็นสีเขียวทั้งหมด แสดงว่าเครื่องพร้อมทำงานในรอบถัดไปแล้ว แล้วกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 4 ใหม่จนกระทั่งครบทุกสถานะที่ทำการทดลอง

6. ขั้นตอนในการอินทิเกรตพื้นที่ได้กราฟ Chromatogram เพื่อให้ทราบถึงปริมาณที่เป็นไปได้ในการเกิดของแก๊สแต่ละตัว (รายงานผลเป็นร้อยละของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทั้งหมด) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

6.1 เปิด file ที่วิเคราะห์ไว้โดยไปที่ Start > My computer > Drive C > Star > Data > เลือก file ที่ต้องการ > Middle = FID RESULTS > OK

6.2 เลื่อนสัญลักษณ์  ซึ่งบ่งบอกว่าแก๊สที่วิเคราะห์ได้เป็นแก๊สใดบ้างและเวลาเท่าใด โดยลากสัญลักษณ์ดังกล่าวให้ตรงกับกึ่งกลางหรือยอด peak แต่ละ peak ให้เวลาที่  ใกล้เคียงกับเวลาที่ peak นั้น ๆ ปรากฏ

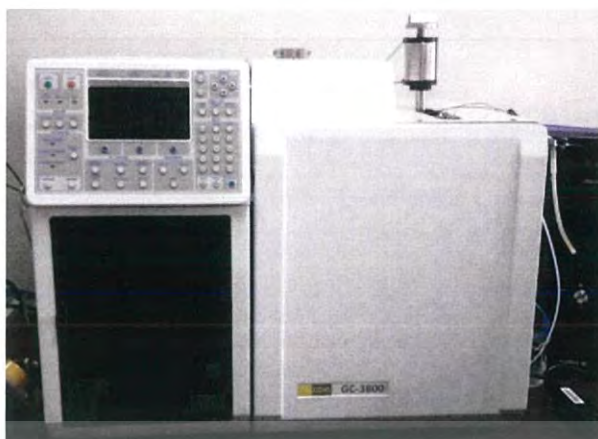
6.3 Reintegrate now > ได้ผลของการอินทิเกรตพื้นที่ได้กราฟ

6.4 คลิกขวาเลือก View Result Only > Middle FID จะรายงานผลเป็นร้อยละของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทั้งหมด

6.5 พิมพ์รายงานผลไปที่ Print

7. ทำการ cool down เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยไปที่ File > Activate method > cool down > Open รอให้อุณหภูมิของ Front TCD ต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส จึงสามารถปิดเครื่องได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของแก๊ส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

สหกิจศึกษาที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิทซูสเปเซียลตีเคมิคอล จำกัด ของวันที่ 21 เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน จึงได้เลือกทำการทดลองในสภาวะดังตารางที่ 4.1

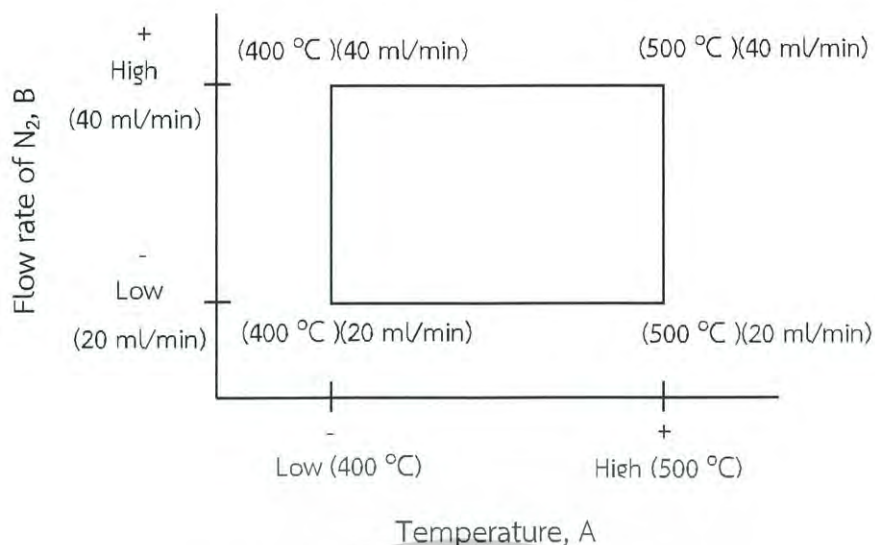
ตารางที่ 4.1 สภาวะที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานของบริษัท ไทยมิทซูสเปเซียลตีเคมิคอล จำกัด

อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิเมตรต่อนาที)	อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส (องศาเซลเซียส)	
	400	500
20	✓	✓
40	✓	✓

จากตารางที่ 4.1 สภาวะที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นการออกแบบการทดลองเชิงแฟก ทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งจากการทดลองมี 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน โดยแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ นั่นคือ ระดับสูงและ ระดับต่ำ

กำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้เป็นปัจจัย A ซึ่งมีระดับอยู่ที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็นปัจจัย B ซึ่งประกอบด้วย 2 ระดับ คือ 20 และ 40 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับ และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูง จะแทนด้วยเครื่องหมาย - และ + บนแกน A และ B ตามลำดับ ดังนั้นเครื่องหมาย - บนแกน A แทนระดับต่ำของอุณหภูมิที่ใช้ (400 °C) และ + แทนด้วยระดับสูงของอุณหภูมิที่ใช้ (500 °C) ส่วนบนแกน B เครื่องหมาย - แทนด้วยระดับต่ำของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (20 ml/min) และ + แทนระดับสูงของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (40 ml/min) ตามลำดับ และร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสซ้ำทั้ง 3 ครั้ง แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2^2 ที่ใช้ในการทดลอง

ดังนั้นในกระบวนการไพโรไลซิสทำเพียง 4 การทดลอง ตามสถานะข้างต้น จากทั้งหมด 9 การทดลอง ซึ่งแสดงดังตารางที่ ค.1 เป็นข้อมูลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่กำหนดก่อนออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จึงทำให้ประหยัดเวลาและงบประมาณที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมัน โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

Factor		Treatment Combination	Replicate (wt%)			Average (wt%)
A	B		I	II	III	
-	-	A low, B low (400,20)	55.85	54.9	55.41	55.39
+	-	A high, B low (500,20)	58.44	57.75	58.16	58.12
-	+	A low, B high (400,40)	55.94	55.77	56.47	56.06
+	+	A high, B high (500,40)	58.65	57.82	58.52	58.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 และ ค.5 ซึ่งเป็นตาราง Anova ของการทดลองแบบ 2 ปัจจัย แสดงค่าทางสถิติ P-value พบว่าปัจจัย A หรืออุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส มีผลต่อร้อยละผลผลิตหรือปริมาณของผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันมากที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1 สมบัติของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรม

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของกากตะกอนน้ำเสีย

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสียแบบประมาณ (Proximate analysis) ประกอบไปด้วย ปริมาณความชื้น (Moisture content) สารที่สามารถระเหยได้ (Volatiles matter) คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) และขี้เถ้า (Ash)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์	Proximate analysis			%Ash
	%Moisture	%Volatile matter	%Fixed carbon	
กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	1.59±0.15	82.58±0.22	11.78±0.88	4.05±0.29

จากตารางที่ 4.3 พบว่ากากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานไทยมิตรชัยสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด มีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 1.59±0.15 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก แสดงว่ากากตะกอนน้ำเสียนี้เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ถ้าหากชีวมวลมีปริมาณความชื้นร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก นั่นคือชีวมวลนั้นไม่เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนองค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ ได้แก่ ปริมาณของสารที่สามารถระเหยได้ง่าย (Volatile matter) และปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) จะเห็นได้ว่าปริมาณของสารที่ระเหยได้ง่ายนั้นมีค่าสูงถึงร้อยละ 82.58±0.22 โดยน้ำหนัก แสดงว่ากากตะกอนน้ำเสียมีส่วนที่ลุกติดไฟหรือเผาไหม้ได้ง่าย และมีปริมาณคาร์บอนคงที่ประมาณร้อยละ 11.78±0.88 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่สูงมากนัก แต่ก็ยังให้ค่าความร้อน (Heating value) ประมาณ 5,745.12±32.31 แคลอรีต่อกรัม นอกจากนี้องค์ประกอบในส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หรือขี้เถ้า (Ash) นั้นมีปริมาณประมาณร้อยละ 4.05±0.29 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก แสดงว่ากากตะกอนน้ำเสียนี้สามารถเปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงได้ในปริมาณมาก ดังนั้นจึงเหมาะแก่การนำมาศึกษาหาปริมาณของของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลวิเคราะห์เอกลักษณ์ของกากตะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

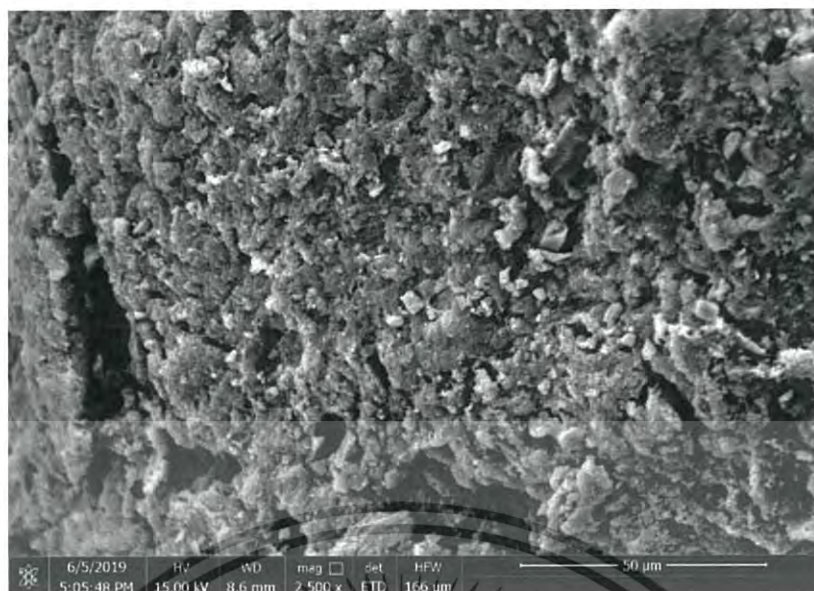
จากการวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของกากตะกอนน้ำเสีย ซึ่งวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 2500 เท่า พบว่าพื้นผิวภายนอกของกากตะกอนน้ำเสียมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนเล็กน้อย มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างสัณฐานของกากตะกอนน้ำเสีย ที่กำลังขยาย 2500 เท่า

ถ่านชาร์ที่นำมาศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา เป็นถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที่ เนื่องจากเป็นสภาวะที่กากตะกอนน้ำเสียมีการแตกสลายของโครงสร้างไปเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพมากที่สุด ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของสหกิจศึกษานี้ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ M.U. Garba [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 โครงสร้างสัณฐานของถ่านชาร์ที่ได้หลังจากกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาทีที่กำลังขยาย 2500 เท่า

จากการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วย SEM ถ่านชาร์เมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าที่กำลังขยาย 2500 เท่า ในรูปที่ 4.3 ถ่านชาร์มีลักษณะของพื้นผิวที่เปลี่ยนไป มีความขรุขระมากขึ้น มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น มีการกระจายตัวของรูพรุนมากขึ้น และเกิดการแตกตัวของโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งการแตกตัวนี้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไปได้ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Neelanjan Bhattacharjee (2017)

4.2.2 การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometry: EDS)

การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (EDS) ของกากตะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่า มีอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบของกากตะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

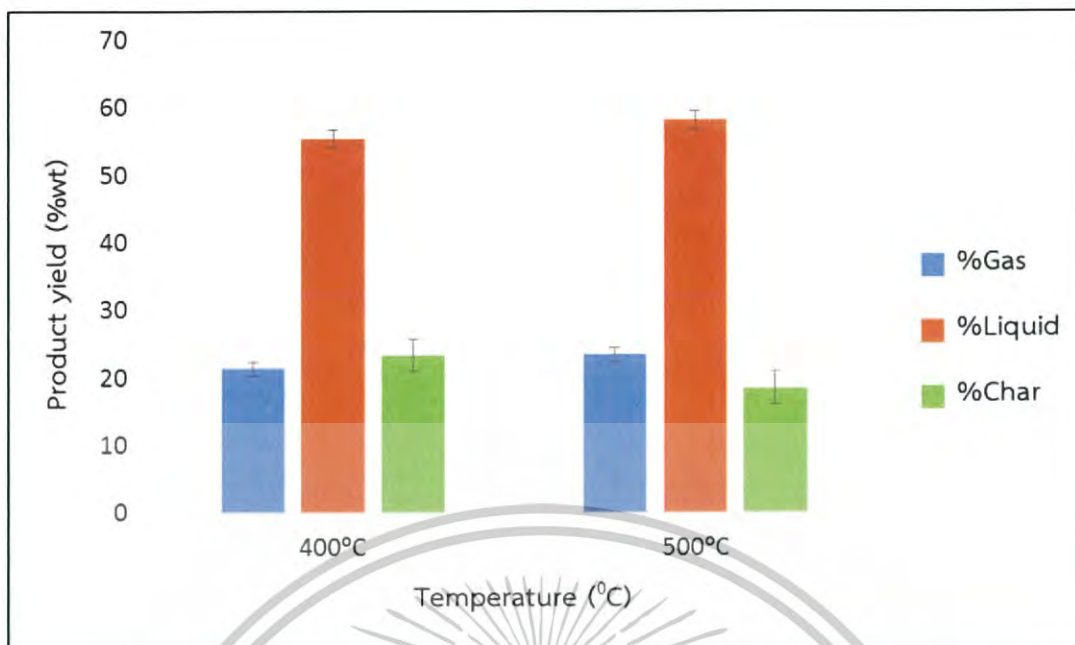
ธาตุองค์ประกอบ	ผลการวิเคราะห์ (wt%)	
	กากตะกอนน้ำเสีย	ถ่านชาร์
คาร์บอน (C)	61.09	40.56
ออกซิเจน (O)	31.40	41.86
แมกนีเซียม (Mg)	0.17	0.56
อะลูมิเนียม (Al)	4.23	7.31
ซิลิกอน (Si)	0.59	2.35
คลอรีน (Cl)	0.22	0.00
แคลเซียม (Ca)	1.50	3.66
เหล็ก (Fe)	0.79	3.70

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ปริมาณของคาร์บอน (C) ที่มีอยู่ในกากตะกอนน้ำเสียมีค่าสูงถึงร้อยละ 61.09 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณคาร์บอนลดลงเหลืออยู่ที่ร้อยละ 40.56 โดยน้ำหนัก ทำให้ทราบว่าโครงสร้างของกากตะกอนน้ำเสียสามารถเกิดการแตกสลายโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ ดังนั้นกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานของบริษัท ไทยมิตซูซุสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ด้วยการนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

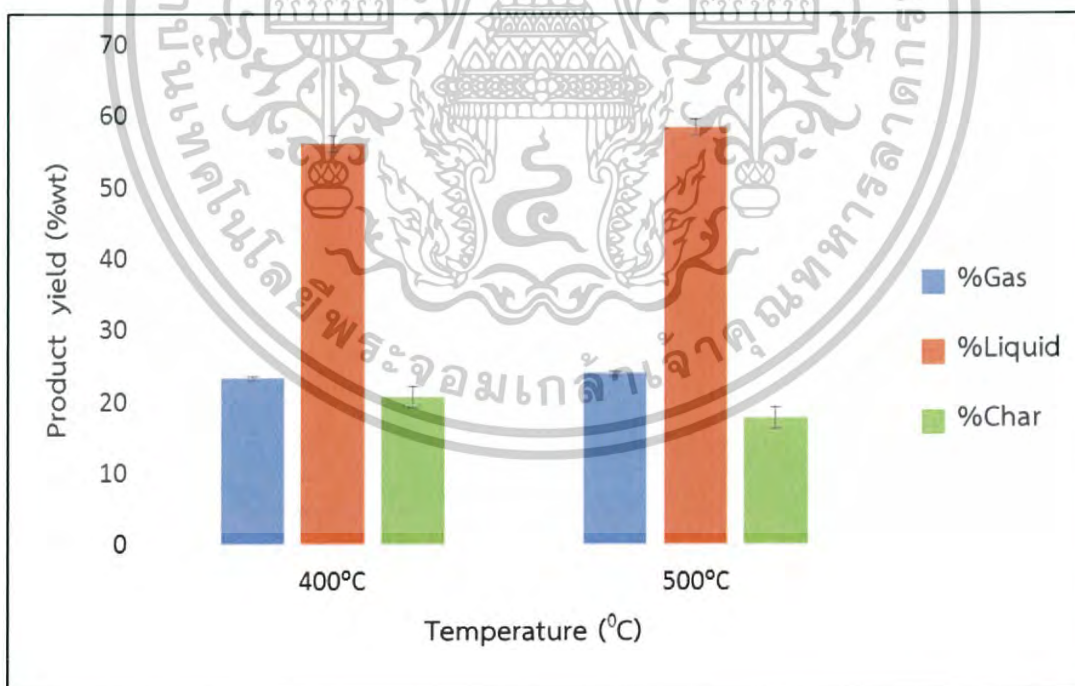
4.3 กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

จากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 และ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ที่มีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง บันทึกน้ำหนักผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ แล้วคำนวณหาค่าร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะ แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ค่ายร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของแก๊ส น้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที



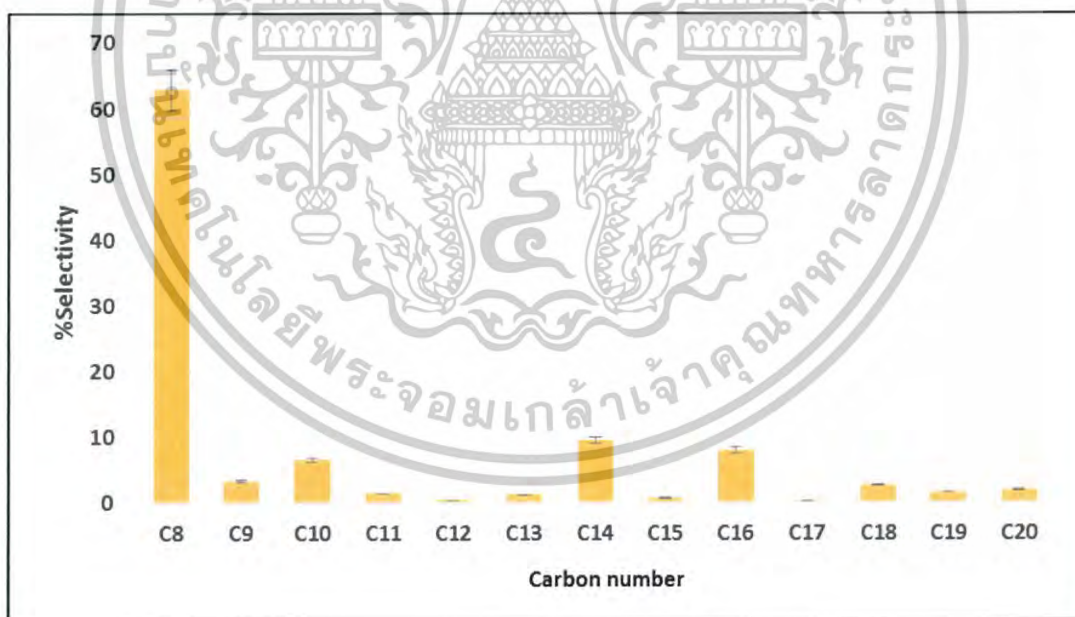
รูปที่ 4.5 ค่ายร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของแก๊ส น้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

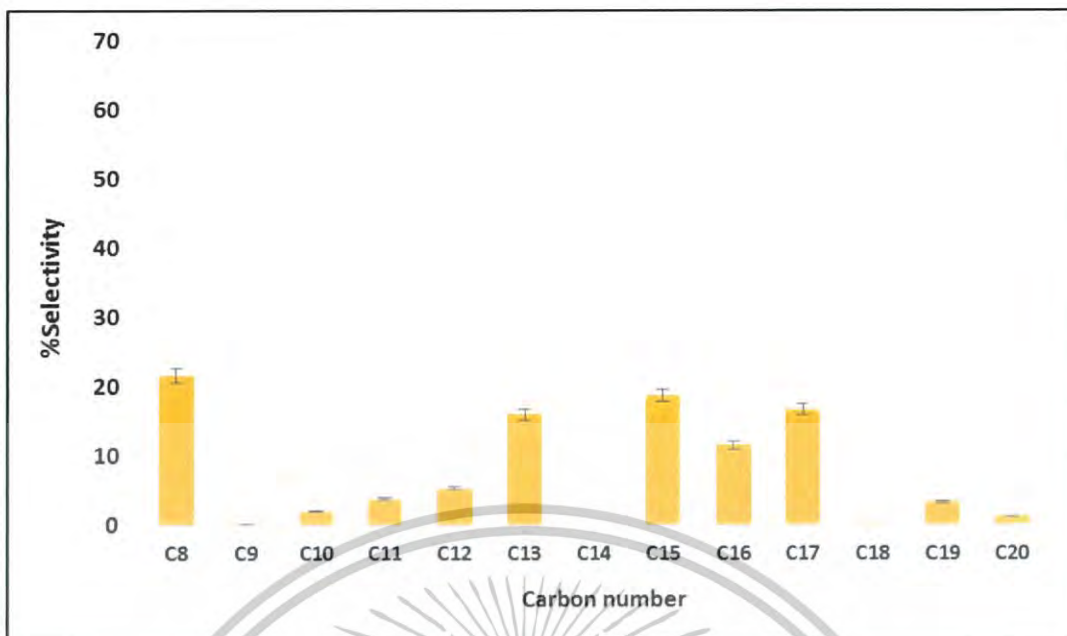
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ผลผลิตในส่วนของของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากตะกอนน้ำเสียนั้นมีค่ามากที่สุด หรือคิดเป็นร้อยละ 58.33 โดยน้ำหนัก ซึ่งสังเกตได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการไพโรไลซิสมากขึ้น ค่าร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากองค์ประกอบของกากตะกอนน้ำเสียหรือไฮโดรคาร์บอนที่สามารถระเหยได้ นั้นกลายไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและหากไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนจำนวน 5 อะตอมขึ้นไป จะสามารถควบแน่นผ่านอุปกรณ์ควบแน่นด้วยความเย็น (Ice water trap) ได้เป็นน้ำมันมากขึ้น และองค์ประกอบที่ไม่สามารถระเหยได้จึงเป็นถ่านชาร์ที่เหลือออกมาจากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพนั้นเป็นไปตามการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k และสอดคล้องกับงานวิจัยของ M.U. Garba et al. [28]

สำหรับผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถนำมาวิเคราะห์หาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ยี่ห้อ Chrompack รุ่น CP 9002 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.6-4.9

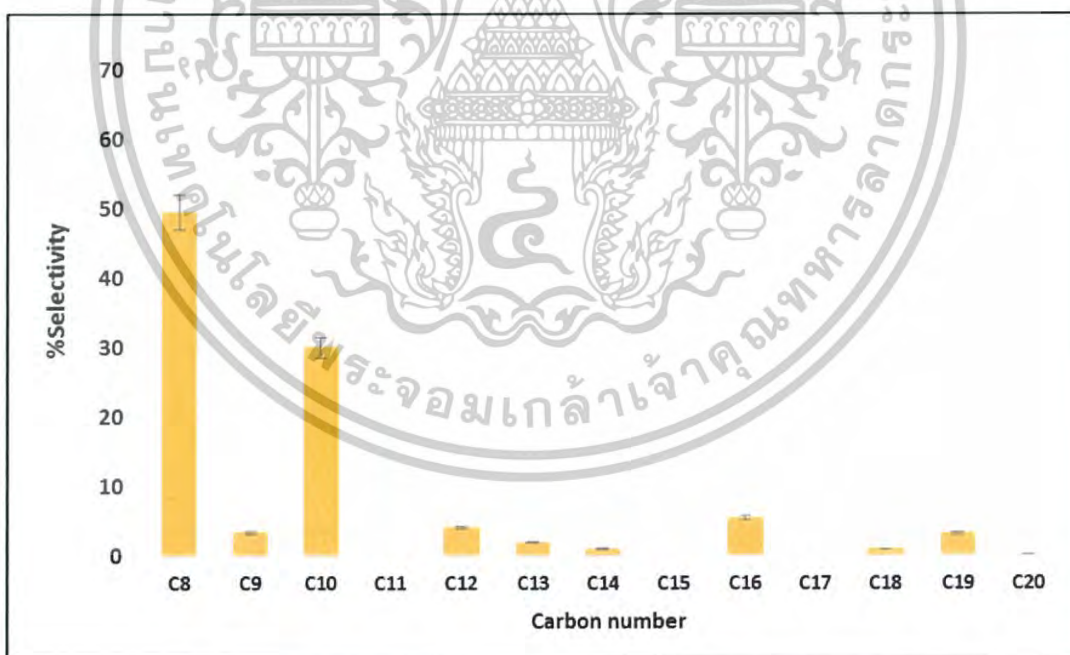


รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิ 400 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 ml/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



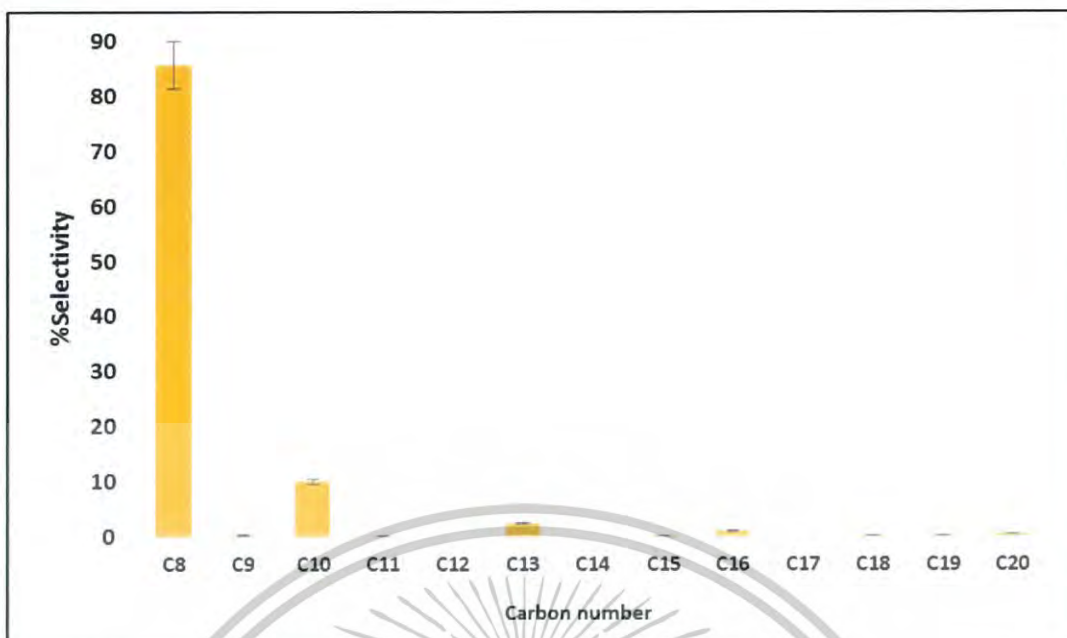
รูปที่ 4.7 คาร์บอนเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิ 400 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 ml/min



รูปที่ 4.8 คาร์บอนเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม จากกระบวนการ

ไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิ 500 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 ml/min

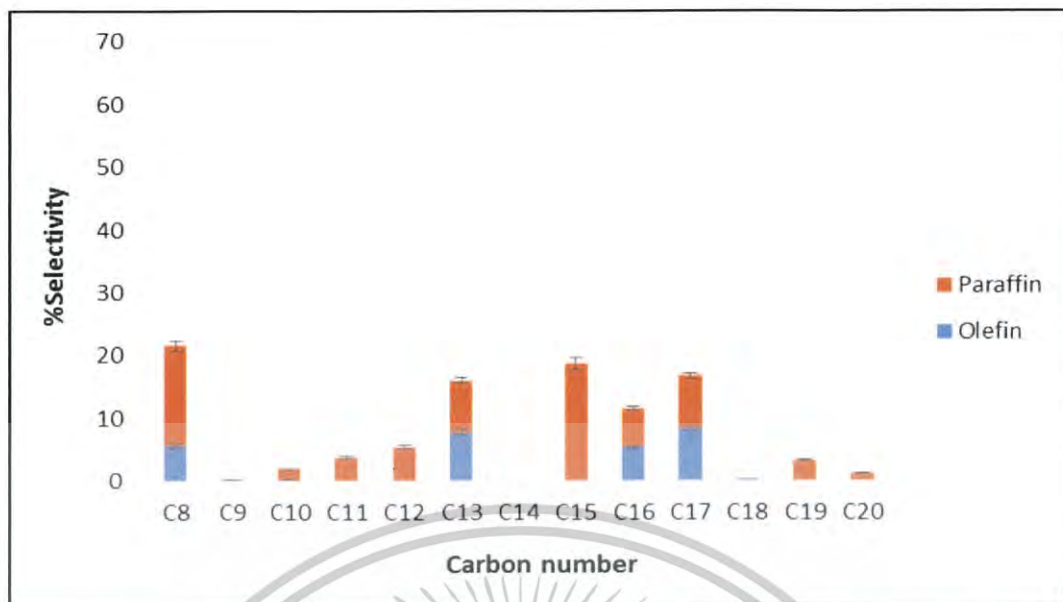
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 คาร์บอนเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้อุณหภูมิ 500 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 ml/min

จากรูปที่ 4.6-4.9 พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที มีคาร์บอนเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพมากที่สุด แต่หากพิจารณาปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้น จะสังเกตได้ว่าสภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที มีอัตราการเลือกเกิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่กระจายตัวสูงกว่า ดังนั้นในการนำมาใช้งานควรเลือกทำการไพโรไลซิสที่สภาวะดังกล่าว

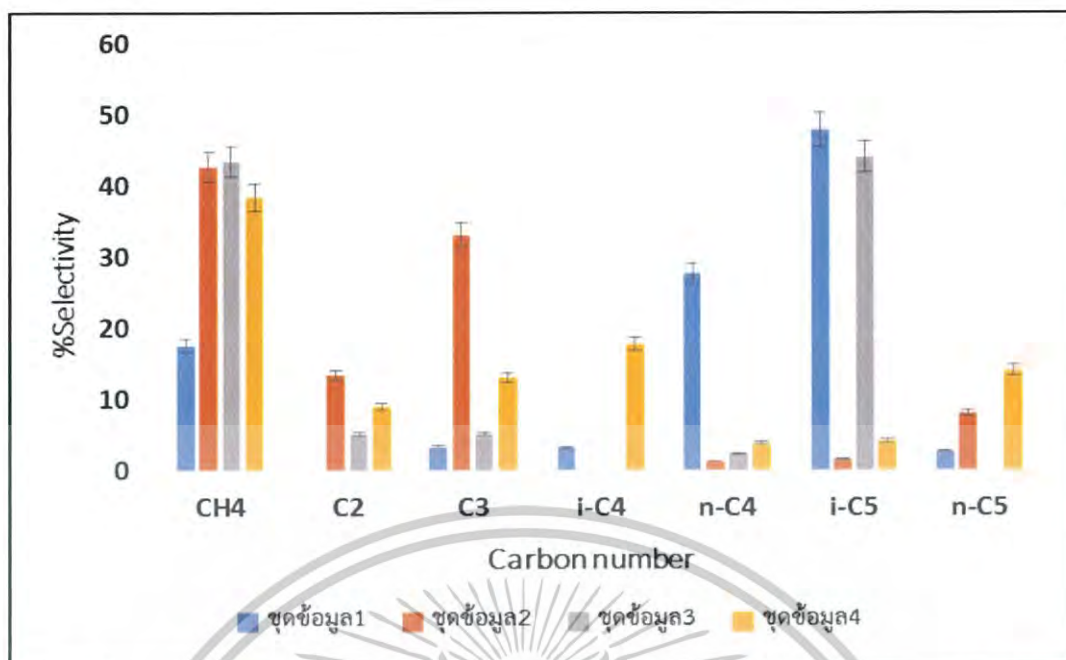
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่าร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที

จากสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสจากตะกอนน้ำเสีย เมื่อนำน้ำมันชีวภาพที่ได้จากสภาวะดังกล่าวมาผสมกับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เพื่อศึกษาประเภทของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสามารถออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มโอเลฟินและพาราฟิน ดังรูปที่ 4.10 พบว่ากลุ่มโอเลฟินมีปริมาณมากกว่า โดยสารประกอบกลุ่มโอเลฟินมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าสารประกอบกลุ่มพาราฟิน เนื่องจากสารประกอบกลุ่มโอเลฟิน เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ออกซิเจน และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จะเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้นได้ อย่างเช่น เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล เป็นต้น [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



* โดยชุดข้อมูล 1 แทนสภาวะอุณหภูมิ 400 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 ml/min
 ชุดข้อมูล 2 แทนสภาวะอุณหภูมิ 400 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 ml/min
 ชุดข้อมูล 3 แทนสภาวะอุณหภูมิ 500 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 ml/min
 ชุดข้อมูล 4 แทนสภาวะอุณหภูมิ 500 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 ml/min

รูปที่ 4.11 ค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สเฉื่อย ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 5 อะตอม จากกระบวนการไพโรไลซิส

จากรูปที่ 4.11 แสดงปริมาณการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สเฉื่อย พบว่าทุกสภาวะของกระบวนการไพโรไลซิส ให้ปริมาณของแก๊สมีเทน (CH₄) มากที่สุด เนื่องมาจากการสลายตัวของกากตะกอนน้ำเสีย ในช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส โดยช่วงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสยังไม่สูงพอที่จะทำให้กากตะกอนบางส่วนสามารถระเหยกลายเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สได้ จึงทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 2 ถึง 5 อะตอม เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยกว่าแก๊สมีเทน ซึ่งแก๊สมีเทนสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ได้ (Natural Gas for Vehicles : NGV) แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 2 และ 3 อะตอม เป็นวัตถุดิบในการผลิตเม็ดพลาสติก แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 4 อะตอม ทั้งในรูปไอโซและนอร์มอล สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเติมแต่ง เพื่อเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมัน และแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 5 อะตอม สามารถกลั่นเป็นน้ำมันเบนซินได้ (Motor gasoline) และเป็นตัวทำละลายใน อุตสาหกรรมสีแลคเกอร์ (lacquer) และทินเนอร์ (thinner) [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นหรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในสหกิจศึกษานี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) จากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงาน ไทยมิตรชูสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 และ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 และ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ และทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ (Proximate analysis), การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value), การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometry: EDS) ของกากตะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งได้ผลการวิจัยดังนี้

5.1 สรุปผลของกระบวนการไพโรไลซิส

จากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงาน ไทยมิตรชูสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 และ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 และ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 58.33 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k หากพิจารณาปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันชีวภาพ สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที เหมาะแก่การนำมาใช้งานมากที่สุด

เมื่อวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5,745.12 \pm 32.31$ แคลอรีต่อกรัม และวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ (Proximate analysis) ของกากตะกอนน้ำเสีย พบว่ามีปริมาณความชื้นร้อยละ 1.59 ± 0.15 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก แสดงว่ากากตะกอนน้ำเสียนี้เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนปริมาณของสารที่สามารถระเหยได้ง่าย (Volatile matter) ซึ่งแสดงส่วนที่ลุกติดไฟหรือเผาไหม้ได้ง่าย มีค่าเท่ากับร้อยละ 82.58 ± 0.22 โดย

น้ำหนัก ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) เป็นส่วนประกอบที่สามารถระเหยได้ยาก ซึ่งแสดงถึงค่าไม่ว่องไวใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงเวลาที่กากตะกอนนั้นเกิดการลุกไหม้ มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 11.78 ± 0.88 โดยน้ำหนัก และปริมาณขี้เถ้า (Ash) หรือส่วนที่ไม่สามารถระเหยได้ มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 4.05 ± 0.29 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก ดังนั้นกากตะกอนน้ำเสียนี้เหมาะแก่การนำมาศึกษาหาปริมาณของน้ำมันชีวภาพ โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อนำกากตะกอนน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากสภาวะดังกล่าวไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าพื้นผิวของถ่านชาร์มีลักษณะขรุขระและรูพรุนเพิ่มมากขึ้นจากกากตะกอนน้ำเสียก่อนทำการไพโรไลซิส ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (EDS) โดยพิจารณาที่ธาตุคาร์บอนของถ่านชาร์ มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 40.56 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าลดลงจากกากตะกอนน้ำเสียก่อนผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 61.09 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าเมื่อกากตะกอนน้ำเสียได้รับความร้อนในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน สามารถสลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของแก๊สและน้ำมันชีวภาพได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยต่อไปควรศึกษาการนำถ่านชาร์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมาใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น สารปรับปรุงดินให้ร่วนซุย เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของถ่านมีความเป็นรูพรุนส่งผลให้การอุ้มน้ำของดินดีขึ้น หรือปรับปรุงดินเปรี้ยวให้มีสภาวะเป็นกลาง และสามารถใช้เป็นสารดูดซับในระบบกรองหรือบำบัดน้ำเสียได้ เป็นต้น และการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเช่น H-ZSM-5 เพราะเป็นตัวเร่งที่ช่วยเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวให้มีปริมาณมากขึ้น ทั้งยังลดปริมาณการเกิดไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนจำนวนมาก (Coke) [26] เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมัน ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมได้ เนื่องจากน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยตรงนั้นยังมีความไม่บริสุทธิ์ของสารที่เป็นองค์ประกอบ อาจทำให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosion) และอุดตันภายในเครื่องยนต์หรือเครื่องจักร นอกจากนี้ยังเป็นการศึกษาหาค่าร้อยละผลผลิต (%Yield) และร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันชีวภาพ (%Selectivity) ที่ได้หลังจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Inergyguru. 2562. **ปรากฏการณ์เรือนกระจก**. [Online]. Available : <https://ienergyguru.com/ปรากฏการณ์เรือนกระจก>.
- [2] Energyvision. 2562. **พลังงานชีวมวล**. [Online]. Available : <http://www.energyvision.co.th/14424507/พลังงานชีวมวล>.
- [3] Trueenergy. 2562. **ชีวมวล**. [Online]. Available : <http://www.trueenergy.co.th/page/biomass>.
- [4] นรากร ลุนธาตุ และมณฑิตา สีหล้า. 2562. **พลังงานแห่งอนาคต (มวลชีวภาพ)**. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/bioenergynaka/phlangngan-haeng-xnakht/phuch-phlangngan-chnid-him>.
- [5] **ปัญหาด้านการใช้พลังงานในประเทศ**. [Online]. Available : <http://www.assosolare.org/energyissues.html>.
- [6] รงรอง หอมหวน. 2549. “พลังงานทางเลือก (Alternative Energy).” วารสารข่าวศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง. 20(1). 5-8.
- [7] วรดาห์ มูลศรีแก้ว. 2551. “การผลิตน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลไม้มะนาว และปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [8] ประริญา ร้าไฟ. 2546. “การศึกษาศักยภาพภาคตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทอินทรีย์สารเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง.” คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [9] ประพันธ์ รักชีพเศษ. 2562. **การเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพ**. [Online]. Available : <http://www.mdboilers.com>.
- [10] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2562. **การสันดาป (Combustion technology)**. [Online]. Available : http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=487 กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [11] Neutronphysics. 2562. **กระบวนการผลิต Pyrolysis**. [Online]. Available : http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=453.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Mechdesign. 2562. **กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน**. [Online]. Available : <http://www.mechdesign.co.th/15781083/กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน>.
- [13] พรรณณา สมเชื้อเวียง. 2555. “การผลิตน้ำมันชีวมวลจากกากสบู่ดำโดยปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน.” สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [14] กุลนันท์ วีรณรงค์กร และอมรชัย อภรณ์วิชานพ. 2015. “Biofuel ไพโรไลซิส (pyrolysis).” *Innomag Energy & Environmental*. 2015(42) : 61-64
- [15] ศิริรัตน์ จิตการคำ. 2562. **เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก**. [Online]. Available : www.dpim.go.th/service/download?articleid=3499&F=6509.
- [17] Kang yong group. 2562. **ระบบแก๊สซิฟิเคชัน**. [Online]. Available : <https://www.kyg.co.th/products-services/gasification-system>.
- [18] ศิริรัตน์ จิตการคำ. 2562. **หลักการของกระบวนการไพโรไลซิส**. [Online]. Available : <http://www.siampattana.com>
- [19] ชัน ชาร์โคล. 2562. **การใช้ประโยชน์จากถ่าน**. [Online]. Available : <http://www.tanncharcoal.com/การใช้ประโยชน์จากถ่าน.html>.
- [20] ชัยวิทย์ วงศ์หิรัญวัฒน์. 2554. “การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดกาแฟ ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันและอัลเคเลชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/MCM-41 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยากรด.” สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [21] อธิพล พรเทวบัญชา. 2556. “การตรวจวิเคราะห์เขม่าป็นภายในรถยนต์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectroscop (SEM/EDX).” *ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร*.
- [22] วลัยรัตน์ อุตตะมะปรากรม และธราพงษ์ วิทิตสานนท์. 2554. “การผลิตถ่านอัดแท่งจากตะกอนเปียกเหลือทิ้งจากการผลิตเอทานอลจากมันเส้น.” *วารสารวิจัยพลังงาน*. 2543(8). 1-19.
- [23] **ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปีเพาะปลูก**. 2556. [Online]. Available : <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปีเพาะปลูก>.
- [24] ธราธร มงคลศรี. 2562. **Pyrolysis and waste heat recovery**. [Online]. Available : http://tamagozilla.blogspot.com/2016/03/pyrolysis-and-waste-heat-recovery-mo_3.html.
- [25] Amnar AL-Kawaz. “Crude oils.” *Petrochemical Industry*. 2011. pp. 1-6.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] วิณัฐ สุดสุข และ ศิริภัสสร เกียรติพงษ์พร. 2562. “การไพโรไลซิสของใยผลปาล์ม เปลือกเมล็ดกาแฟและไม้ยูคาลิปตัส.” สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [27] Patrick J. McNamara, Jon Koch, Zhongzhe Liu, Daniel Zitomer. “Pyrolysis of Dried Wastewater Biosolids Can Be Energy Positive.” *Water Environment Research*, vol 88. 2016. pp. 804-810.
- [28] M.U. Garba, Umaru Musa, A.G. Olugbenga, Yahaya S. Mohammad, A.A. Ibrahim. “Catalytic upgrading of bio-oil from bagasse: Thermogravimetric analysis and fixed bed pyrolysis.” *Journal of Basic and Applied Sciences*, vol 7. 2018. pp. 776-781.
- [29] Javier Abrego, Isabel Fonts, Gloria Gea, Manuel Azuara. “Sewage sludge pyrolysis for liquid production.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 16. 2012. pp. 2781-2805.
- [30] M. Rehan, R. Miandad, M.A. Barakat, M.Z. Khan, A. Demirbas, A.S.Nizami. “Effect of zeolite catalyst on pyrolysis liquid oil.” *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol 119. 2017. pp.162-175.
- [31] Neelanjan Bhattacharjee, Asit Baran Biswas. “Pyrolysis of *Alternanthera philoxeroides* (alligator weed): Effect of pyrolysis parameter on product yield and characterization of liquid product and bio char.” *Journal of Energy Institute*. 2017. pp. 1-14.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลและกราฟแสดงค่าร้อยละผลผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย
ที่ได้รับจากโรงงาน ไทยมิตรชัยเปปเซียลตี้เคมีคอล จำกัด

1. การคำนวณร้อยละผลผลิต (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดลองที่ใช้ในการคำนวณร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ
ไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสีย

สภาวะในการทดลอง		ครั้งที่	น้ำหนัก	น้ำหนัก	น้ำมัน ชีวภาพ (g)	ถ่านชาร์ (g)
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล ของแก๊ส ไนโตรเจน (ml/min)		กากตะกอน น้ำเสีย (g)	ทราย ควอตซ์ (g)		
400	20	1	0.5098	0.5121	0.2847	0.1165
		2	0.5097	0.5085	0.2798	0.1311
		3	0.5122	0.5025	0.2838	0.1093
	40	1	0.5095	0.5060	0.2850	0.1071
		2	0.5089	0.5087	0.2838	0.1033
		3	0.5060	0.5086	0.2857	0.1046
500	20	1	0.5048	0.5017	0.2950	0.0896
		2	0.5143	0.5111	0.2970	0.0998
		3	0.5055	0.5052	0.2940	0.0921
	40	1	0.5064	0.5108	0.2970	0.0916
		2	0.5173	0.5088	0.2991	0.0909
		3	0.5104	0.5054	0.2987	0.0898

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\text{ร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่ได้} - \text{น้ำหนักทรายควอตซ์}}{\text{น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลผลิตของแก๊ส} = 100 - [(\text{ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ}) + (\text{ร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์})]$$

ตัวอย่างการคำนวณ ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊ส ของการทดลองครั้งที่ 1 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที

$$\text{น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย} = 0.5098 \text{ g.}$$

$$\text{น้ำหนักทรายควอตซ์} = 0.5121 \text{ g.}$$

$$\text{น้ำหนักน้ำมันชีวภาพ} = 0.2847 \text{ g.}$$

จากสูตร :

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

$$= \frac{0.2847 \text{ g.}}{0.5098 \text{ g.}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ} = 55.85 \text{ wt\%}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร :

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์} &= \frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่ได้} - \text{น้ำหนักทรายควอตซ์}}{\text{น้ำหนักกากตะกอนน้ำเสีย}} \times 100 \\ &= \frac{0.6286 \text{ g.} - 0.5121 \text{ g.}}{0.5098 \text{ g.}} \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{ร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์} = 22.85 \text{ wt\%}$$

จากสูตร :

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลผลิตของแก๊ส} &= 100 - [(\text{ร้อยละผลผลิตน้ำมันชีวภาพ}) + (\text{ร้อยละผลผลิตถ่านชาร์})] \\ &= 100 - [(55.85 + 22.85) \text{ wt\%}] \end{aligned}$$

$$\text{ร้อยละผลผลิตของแก๊ส} = 21.30 \text{ wt\%}$$

ดังนั้น ร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊ส ของการทดลองครั้งที่ 1 เท่ากับ ร้อยละ 55.85, 22.85 และ 21.30 โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ผลการคำนวณร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน
น้ำเสีย

สภาวะในการทดลอง		ครั้งที่	ร้อยละผลผลิตที่ได้ (wt%)		
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน (mL/min)		แก๊ส	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์
400	20	1	21.30	55.85	22.85
		2	19.38	54.90	25.72
		3	23.25	55.41	21.34
		ค่าเฉลี่ย	21.31	55.39	23.30
	40	1	23.04	55.94	21.02
		2	23.93	55.77	20.30
		3	22.86	56.47	20.67
		ค่าเฉลี่ย	23.28	56.06	20.66
500	20	1	23.81	58.44	17.75
		2	22.85	57.75	19.41
		3	23.62	58.16	18.22
		ค่าเฉลี่ย	23.43	58.12	18.46
	40	1	23.26	58.65	18.09
		2	24.61	57.82	17.57
		3	23.89	58.52	17.59
		ค่าเฉลี่ย	23.92	58.33	17.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณร้อยละผลผลิตเฉลี่ย (%Yield) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันชีวภาพภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 mL/min

$$\% \text{Yield เฉลี่ยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน} = \% \text{Selectivity เฉลี่ยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนนั้น} \times \% \text{Yield เฉลี่ยของน้ำมันที่สภาวะใด ๆ}$$

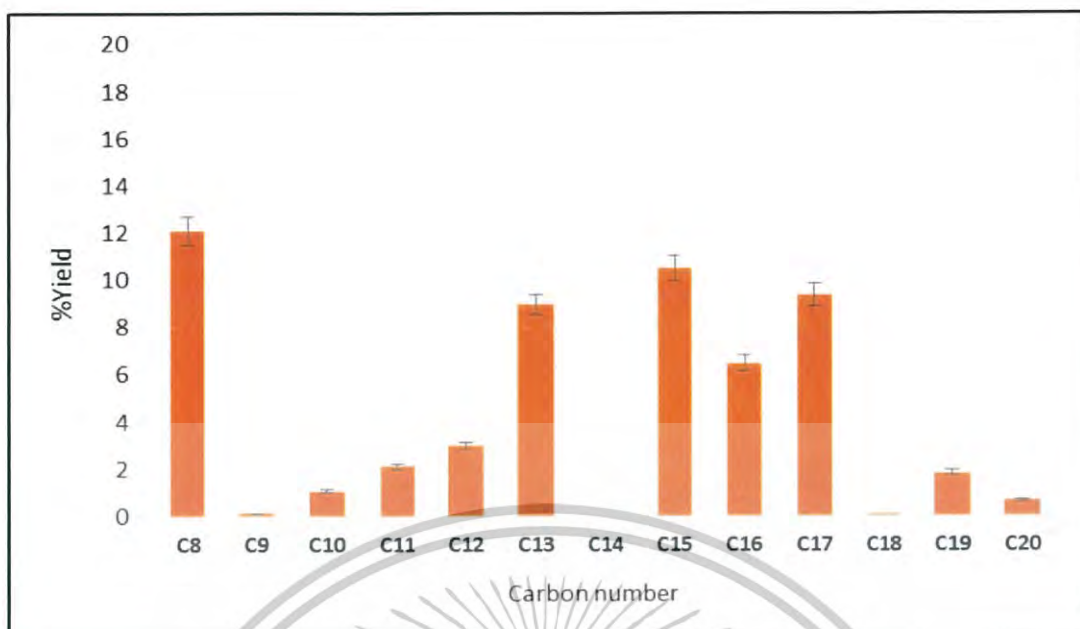
ตัวอย่างการคำนวณ ร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนจำนวน 8 อะตอม (C_8) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที

จากสูตร :

$$\begin{aligned} \% \text{Yield ของ } C_8 &= \% \text{Selectivity ของ } C_8 \times \% \text{Yield เฉลี่ยของน้ำมัน} \\ &= \frac{21.55}{100} \times 56.06 \\ &= 12.08 \text{ wt\%} \end{aligned}$$

ร้อยละผลผลิตของ C_8 เท่ากับ 12.08 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 ค่าร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 ถึง 20 อะตอม ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

1. การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)

1.1 การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ

ร้อยละการเลือกเกิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนใด ๆ กลุ่มพาราฟิน

$$\text{ร้อยละการเลือกเกิดของสารที่คาร์บอนใด ๆ} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของสารประกอบที่คาร์บอนใด ๆ}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมสารกลุ่มพาราฟินและโอเลฟิน}} \times 100$$

ร้อยละการเลือกเกิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนใด ๆ กลุ่มโอเลฟิน

$$\text{ร้อยละการเลือกเกิดของสารที่คาร์บอนใด ๆ} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของสารประกอบที่คาร์บอนใด ๆ}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมสารกลุ่มพาราฟินและโอเลฟิน}} \times 100$$

โดยที่ร้อยละการเลือกเกิดของสารกลุ่มพาราฟิน (Paraffin) และสารกลุ่มโอเลฟิน (Olefin) ทั้งหมดคิดจากร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพที่ได้

ตัวอย่างการคำนวณ ในการทดลองครั้งที่ 1 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ พิจารณาที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 8 อะตอม (C₈)

จากสูตร :

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการเลือกเกิดของ C}_8 \text{ กลุ่มพาราฟิน} &= \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของ C}_8}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมสารกลุ่มพาราฟินและโอเลฟิน}} \times 100 \\ &= \frac{455539}{4605606} \times 100 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ร้อยละการเลือกเกิดของ } C_8 = 9.89\%$$

จากสูตร :

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการเลือกเกิด} &= \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของ } C_8}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมสารกลุ่มพาราฟินและโอเลฟิน}} \times 100 \\ \text{ของ } C_8 \text{ กลุ่มโอเลฟิน} &= \frac{93152}{4605606} \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{ร้อยละการเลือกเกิดของ } C_8 = 7.87\%$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) แลกลุ่มโอเลฟิน (Olefin) ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 1

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)							
	อุณหภูมิ 400 °C				อุณหภูมิ 500 °C			
	อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min	
	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin
C ₈	362387	455539	466131	635116	342168	374496	422078	479114
C ₉	13744	17220	1565	2228	26256	28085	4308	5889
C ₁₀	351126	352222	0	447639	0	822244	203803	205101
C ₁₁	0	5253	546	1230	0	2693	1575	0
C ₁₂	0	1821	0	0	0	311062	0	0
C ₁₃	0	0	0	0	0	2507	0	51032
C ₁₄	1157324	5496	0	0	0	77958	0	0
C ₁₅	0	6996	10779	11729	0	0	0	3832
C ₁₆	511855	551995	1350618	1350618	0	406013	0	39511
C ₁₇	0	0	2135107	2135107	0	0	0	0
C ₁₈	334492	36462	3247	0	34815	38318	587	1766
C ₁₉	91935	99093	0	0	0	13097	0	5514
C ₂₀	250646	0	0	6689	5763	8937	6660	11220
Total	3073509	1532097	3967993	4590356	409002	2085410	639011	802979

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่
กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) และกลุ่มโอเลฟิน (Olefin) ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 1

Carbon number	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)							
	อุณหภูมิ 400 °C				อุณหภูมิ 500 °C			
	อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min	
	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin
C ₈	7.87	9.89	5.45	7.42	13.72	15.01	29.27	33.23
C ₉	0.30	0.37	0.02	0.03	1.05	1.13	0.30	0.41
C ₁₀	7.62	7.65	0.00	5.23	0.00	32.96	14.13	14.22
C ₁₁	0.00	0.11	0.01	0.01	0.00	0.11	0.11	0.00
C ₁₂	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	12.47	0.00	0.00
C ₁₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	3.54
C ₁₄	25.13	0.12	0.00	0.00	0.00	3.13	0.00	0.00
C ₁₅	0.00	0.15	0.13	0.14	0.00	0.00	0.00	0.27
C ₁₆	11.11	11.99	15.78	15.78	0.00	16.28	0.00	2.74
C ₁₇	0.00	0.00	24.95	24.95	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₈	7.26	0.79	0.04	0.00	1.40	1.54	0.04	0.12
C ₁₉	2.00	2.15	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.38
C ₂₀	5.44	0.00	0.00	0.08	0.23	0.36	0.46	0.78
Total	66.73	33.27	46.36	53.64	16.40	83.60	44.31	55.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันซีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) และกลุ่มโอเลฟิน (Olefin) ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 2

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)							
	อุณหภูมิ 400 °C				อุณหภูมิ 500 °C			
	อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min	
	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin
C ₈	1317272	1328527	3989	77072	72492	0	1396	0
C ₉	0	47477	2109	930	1672	0	0	0
C ₁₀	0	69844	0	0	0	0	0	0
C ₁₁	0	128716	0	56378	0	0	0	0
C ₁₂	0	38471	0	0	0	0	0	0
C ₁₃	29249	30401	14868	17987	2544	0	0	0
C ₁₄	0	104959	0	0	0	0	0	0
C ₁₅	0	58658	0	311205	0	0	0	0
C ₁₆	0	21789	0	0	0	0	0	0
C ₁₇	0	14224	0	0	0	0	0	0
C ₁₈	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₁₉	0	15315	0	53952	0	7597	0	0
C ₂₀	0	956	0	18161	0	0	0	0
Total	1346521	1859337	20966	535685	76708	7597	1396	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) และกลุ่มโอเลฟิน (Olefin) ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 2

Carbon number	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)							
	อุณหภูมิ 400 °C				อุณหภูมิ 500 °C			
	อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min	
	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin
C ₈	41.09	41.44	0.72	13.85	85.99	0.00	100.00	0.00
C ₉	0.00	1.48	0.38	0.17	1.98	0.00	0.00	0.00
C ₁₀	0.00	2.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₁	0.00	4.02	0.00	10.13	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₂	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₃	0.91	0.95	2.67	3.23	3.02	0.00	0.00	0.00
C ₁₄	0.00	3.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₅	0.00	1.83	0.00	55.91	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₆	0.00	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₇	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₈	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₉	0.00	0.48	0.00	9.69	0.00	9.01	0.00	0.00
C ₂₀	0.00	0.03	0.00	3.26	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	42.00	58.00	3.77	96.23	90.99	9.01	100.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) และกลุ่มโอเลฟิน (Olefin) ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 3

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)							
	อุณหภูมิ 400 °C				อุณหภูมิ 500 °C			
	อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min	
	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin
C ₈	110870	1976	60752	154384	50534	4447	108156	2242
C ₉	9897	0	0	0	9607	0	0	0
C ₁₀	2951	0	2465	0	45755	46546	1842	0
C ₁₁	0	0	0	6801	0	0	0	0
C ₁₂	0	0	0	92223	0	0	0	0
C ₁₃	2148	0	119548	123302	4388	0	4296	0
C ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₁₅	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₁₆	0	0	0	17715	0	0	0	0
C ₁₇	0	0	0	972	0	0	0	0
C ₁₈	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₁₉	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₂₀	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	125866	1976	182765	395397	110284	50993	114294	2242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) และกลุ่มโอเลฟิน (Olefin) ในกระบวนการไพโรไลซิสครั้งที่ 3

Carbon number	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)							
	อุณหภูมิ 400 °C				อุณหภูมิ 500 °C			
	อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min	
	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin
C ₈	86.72	1.55	10.51	26.70	31.33	2.76	92.81	1.92
C ₉	7.74	0.00	0.00	0.00	5.96	0.00	0.00	0.00
C ₁₀	2.31	0.00	0.43	0.00	28.37	28.86	1.58	0.00
C ₁₁	0.00	0.00	0.00	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₂	0.00	0.00	0.00	15.95	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₃	1.68	0.00	20.68	21.33	2.72	0.00	3.69	0.00
C ₁₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₆	0.00	0.00	0.00	3.06	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₇	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₈	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₉	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₂₀	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	98.45	1.55	31.61	68.39	68.38	31.62	98.08	1.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย โดยแบ่งองค์ประกอบ ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) และกลุ่มโอเลฟิน (Olefin)

Carbon number	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)							
	อุณหภูมิ 400 °C				อุณหภูมิ 500 °C			
	อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 20 ml/min		อัตราการไหล N ₂ 40 ml/min	
	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin	Olefin	Paraffin
C ₈	45.23	17.63	5.56	15.99	43.68	5.92	74.03	11.72
C ₉	2.68	0.62	0.13	0.07	3.00	0.38	0.10	0.14
C ₁₀	3.31	3.28	0.14	1.74	9.46	20.61	5.24	4.74
C ₁₁	0.00	1.38	0.00	3.77	0.00	0.04	0.04	0.00
C ₁₂	0.00	0.41	0.00	5.32	0.00	4.16	0.00	0.00
C ₁₃	0.86	0.32	7.78	8.19	1.91	0.03	1.23	1.18
C ₁₄	8.38	1.13	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00	0.00
C ₁₅	0.00	0.66	0.04	18.68	0.00	0.00	0.00	0.09
C ₁₆	3.70	4.22	5.26	6.28	0.00	5.43	0.00	0.91
C ₁₇	0.00	0.15	8.32	8.37	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₁₈	2.42	0.26	0.01	0.00	0.47	0.51	0.01	0.04
C ₁₉	0.67	0.88	0.00	3.23	0.00	3.18	0.00	0.13
C ₂₀	1.81	0.01	0.00	1.11	0.08	0.12	0.15	0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊ส

$$\text{ร้อยละการเลือกเกิดของสารที่คาร์บอนใด ๆ} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของสารประกอบที่คาร์บอนใด ๆ}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมของแก๊ส}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ในการทดลองครั้งที่ 1 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊ส พิจารณาที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 1 อะตอม (C_1)

จากสูตร :

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการเลือกเกิดของ } C_1 &= \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของ } C_1}{\text{พื้นที่ใต้กราฟรวมของแก๊ส}} \times 100 \\ &= \frac{14052}{99778} \times 100 \\ \text{ร้อยละการเลือกเกิดของ } C_1 &= 14.08\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊ส ในกระบวนการไพโรไลซิส ครั้งที่ 1

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)			
	อุณหภูมิ 400 °C		อุณหภูมิ 500 °C	
	อัตราการไหล N ₂ 20 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 40 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 20 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 40 mL/min
C ₁	14052	2353	2892	562
C ₂	0	297	0	0
C ₃	3233	4747	0	756
i-C ₄	4368	0	0	1645
n-C ₄	71176	0	0	329
i-C ₅	6000	0	16991	525
n-C ₅	949	0	0	448
Total	99778	7397	19883	4265

ตารางที่ ข.9 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊ส ในกระบวนการไพโรไลซิส ครั้งที่ 2

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)			
	อุณหภูมิ 400 °C		อุณหภูมิ 500 °C	
	อัตราการไหล N ₂ 20 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 40 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 20 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 40 mL/min
C ₁	15201	25777	21221	144336
C ₂	0	11200	6056	43326
C ₃	0	12120	4363	31295
i-C ₄	2143	0	0	16510
n-C ₄	5458	1023	1234	1883
i-C ₅	53185	1952	1290	0
n-C ₅	3670	1676	0	36495
Total	79657	53748	34164	273845

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 พื้นที่ใต้กราฟสำหรับคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊ส ในกระบวนการไพโรไลซิส
ครั้งที่ 3

Carbon number	พื้นที่ใต้กราฟ (Area peak)			
	อุณหภูมิ 400 °C		อุณหภูมิ 500 °C	
	อัตราการไหล N ₂ 20 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 40 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 20 mL/min	อัตราการไหล N ₂ 40 mL/min
C ₁	1338960	176363	1543863	50829
C ₂	0	59173	269823	11458
C ₃	0	51039	269967	10278
i-C ₄	162999	0	0	8881
n-C ₄	346491	1982	27604	2978
i-C ₅	4903721	9409	25338	0
n-C ₅	154669	12692	0	18780
Total	6906840	310658	2136595	103204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ผลการคำนวณร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊ส ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนจำนวน 1-5 อะตอม

สถานะในการทดลอง		ครั้งที่	ร้อยละการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (%Selectivity)						
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน (ml/min)		C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄	i-C ₅	n-C ₅
400	20	1	14.08	0	3.24	4.38	71.33	6.01	0.95
		2	19.08	0	0	2.69	6.85	66.77	4.61
		3	19.39	0	0	2.36	5.02	71	2.24
		ค่าเฉลี่ย	17.52	0.00	3.24	3.14	27.73	47.93	2.60
	40	1	31.81	4.02	64.17	0	0	0	0
		2	39.71	17.25	18.67	0	3.01	1.4	19.96
		3	56.77	19.05	16.43	0	0.64	3.03	4.09
		ค่าเฉลี่ย	42.76	13.44	33.09	0.00	1.22	1.48	8.02
500	20	1	14.55	0	0	0	0	85.45	0
		2	43.64	2.54	2.65	0	5.64	45.52	0
		3	72.26	12.63	12.64	0	1.29	1.19	0
		ค่าเฉลี่ย	43.48	5.06	5.10	0.00	2.31	44.05	0.00
	40	1	13.18	0	17.73	38.57	7.71	12.31	10.5
		2	52.71	15.82	11.43	6.03	0.69	0	13.33
		3	49.25	11.1	9.96	8.61	2.89	0	18.2
		ค่าเฉลี่ย	38.38	8.97	13.04	17.74	3.76	4.10	14.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^K

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่กำหนดก่อนออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^K

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (mL/min)		
	20 (-)	30	40 (+)
400 (-)	(-)(-)		(-)(+)
450			
500 (+)	(+)(-)		(+)(+)

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมัน โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (mL/min)					
	20			40		
	I	II	III	I	II	III
400	55.85	54.9	55.41	55.94	55.77	56.47
500	58.44	57.75	58.16	58.65	57.82	58.52

หาค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในตารางที่ ค.2 จะได้

$$\text{Average} = \frac{55.85 + 54.90 + 55.41 + \dots + 58.65 + 57.82 + 58.52}{12}$$

$$\text{Average} = 56.97 \text{ wt\%}$$

จากนั้นนำค่าปริมาณน้ำมันในตารางที่ ค.2 มาลบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันทั้งหมด แสดงได้ดังตารางที่ ค.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ผลต่างของปริมาณผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันและค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันทั้งหมด โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (mL/min)					
	20			40		
	I	II	III	I	II	III
400	-1.12	-2.07	-1.56	-1.03	-1.20	-0.50
500	1.47	0.78	1.19	1.68	0.85	1.55

ตารางที่ ค.4 ผลรวมของปริมาณผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในแต่ละสภาวะจากตารางที่ ค.3 โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจน (mL/min)		y_i
	20	40	
400	-4.75	-2.73	-7.48
500	3.44	4.08	7.52
y_j	-1.31	1.35	

โดยที่ y_i แทนผลรวมของปริมาณน้ำมัน โดยคำนวณจากกรณีของอุณหภูมิคงที่

y_j แทนผลรวมของปริมาณน้ำมัน โดยคำนวณจากกรณีของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนคงที่

ตารางที่ ค.5 ค่ากำลังสองของผลต่างของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (mL/min)					
	20			40		
	I	II	III	I	II	III
400	1.25	4.28	2.43	1.06	1.44	0.25
500	2.16	0.61	1.42	2.82	0.72	2.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในตารางที่ ค.5 จะได้

$$\text{Average} = \frac{1.25 + 4.28 + 2.43 + \dots + 2.82 + 0.72 + 2.40}{12}$$

$$\text{Average} = 20.86 \text{ wt\%}$$

แทนค่า 20.86 ด้วย y_{ijk}^2

กำหนดให้ $y_{i...}$ = ผลรวมของ $y_{i..}$
 $= (-7.48) + 7.52 = 0.04$

$$(y_{i...})^2 = y_{i...} \text{ ยกกำลังสอง}$$

$$= (0.04)^2 = 0.0016$$

$$\text{SUM}(y_{ijk}^2) = \text{ค่า } y_{ijk}^2 \text{ ที่หาได้} = 20.86$$

$$\text{SUM}(y_{i..}^2) = \text{ค่ากำลังสองของ } y_{i..} \text{ แต่ละข้อมูลรวมกัน}$$

$$= (-7.48)^2 + (7.52)^2 = 112.50$$

$$\text{SUM}(y_{.j.}^2) = \text{ค่ากำลังสองของ } y_{.j.} \text{ แต่ละข้อมูลรวมกัน}$$

$$= (-1.31)^2 + (1.35)^2 = 3.54$$

$$\text{SUM}(y_{ij.}^2) = \text{ค่ากำลังสองของข้อมูลในตารางที่ ค.3 รวมกัน}$$

$$= (-7.48)^2 + (7.52)^2 + (-1.31)^2 + (1.35)^2$$

$$= 58.50$$

แทนจำนวนตัวแปรของอุณหภูมิที่ศึกษาด้วย a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2

จำนวนตัวแปรของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ศึกษาด้วย b ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2

จำนวนการทดลองซ้ำด้วย n ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3

จากนั้นหาค่า SS_A , SS_B , SS_{AB} , SS_T และ SS_E ตามสูตรต่อไปนี้

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

ดังนั้นจะได้ $SS_A = 18.75$

$SS_B = 0.59$

$SS_{AB} = 0.16$

$SS_T = 20.86$

$SS_E = 1.36$

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาใส่ในตารางที่ ค.6

ตารางที่ ค.6 Anova ของการทดลองที่มี 2 ปัจจัย

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F ₀	P-Value
A	18.75	1	18.75	110.45	1.17E-05
B	0.59	1	0.589633	3.47	0.0995
AB	0.16	1	0.1587	0.93	0.3631
Error	1.36	8	0.169767		
Total	20.85647	11			

ตารางที่ ค.7 ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลจากตารางที่ ค.2

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจน (ml/min)	
	20	40
400	55.39	56.06
500	58.12	58.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

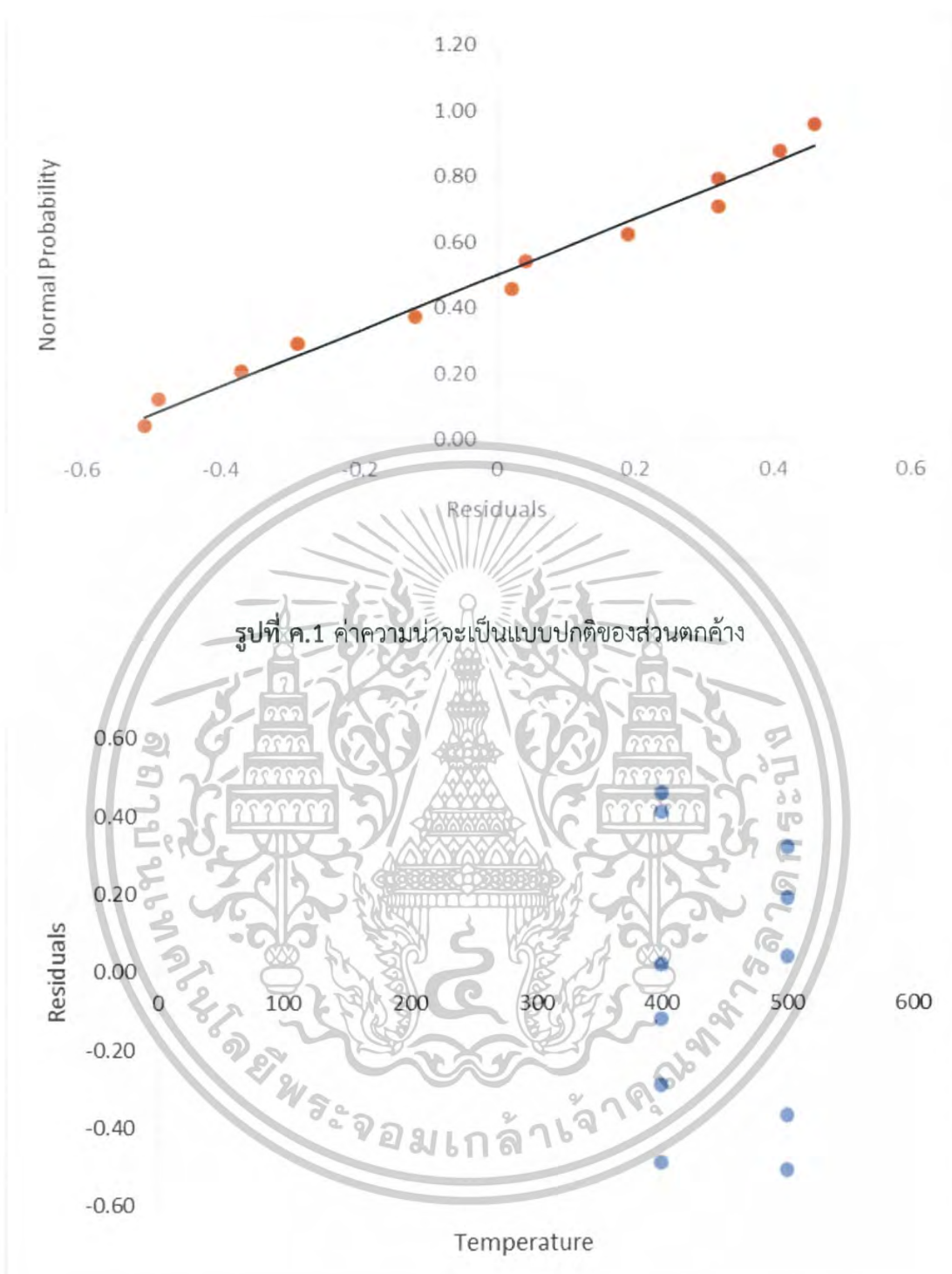
ตารางที่ ค.8 ผลต่างของข้อมูลจากตารางที่ ค.2 และตารางที่ ค.7

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (mL/min)					
	20			40		
	I	II	III	I	II	III
400	0.46	-0.49	0.02	-0.12	-0.29	0.41
500	0.32	-0.37	0.04	0.32	-0.51	0.19

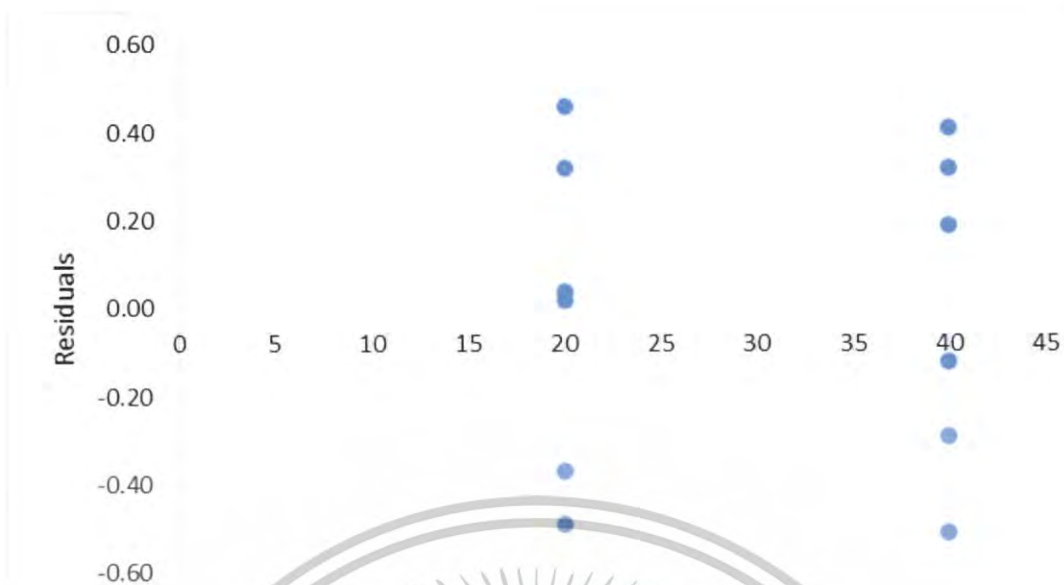
ตารางที่ ค.9 ข้อมูลแสดงส่วนตกค้างและความพอเพียงของแบบจำลอง

Order	Fitted	Residuals	Sort	pk	A	B
	Value		Residuals			
1	55.39	0.46	-0.51	0.04	400	20
2	55.39	-0.49	-0.49	0.13	400	20
3	55.39	0.02	-0.37	0.21	400	20
4	58.12	0.32	-0.29	0.29	500	20
5	58.12	-0.37	-0.12	0.38	500	20
6	58.12	0.04	0.02	0.46	500	20
7	56.06	-0.12	0.04	0.54	400	40
8	56.06	-0.29	0.19	0.63	400	40
9	56.06	0.41	0.32	0.71	400	40
10	58.33	0.32	0.32	0.79	500	40
11	58.33	-0.51	0.41	0.88	500	40
12	58.33	0.19	0.46	0.96	500	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสที่มีผลต่อส่วนตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้