

วัสดุดูดซับประสิทธิภาพสูงจากยางธรรมชาติและเส้นใยคาร์บอนจากดอกธูปฤาษีเพื่อ  
กำจัดคราบน้ำมัน

High Efficiency Sorbent Derived from Natural Rubber and Carbon Fiber from  
Cattail Flowers for Emergent Removal of Oil Spill



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High Efficiency Sorbent Derived from Natural Rubber and Carbon  
Fiber from Cattail Flowers for Emergent Removal of Oil Spill



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING

IN NANOMATERIAL ENGINEERING

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ



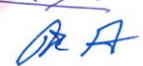
หัวข้อโครงการพิเศษ วัสดุดูดซับประสิทธิภาพสูงจากยางธรรมชาติและเส้นใยคาร์บอนจากดอกกุฎีฤๅษี  
เพื่อกำจัดคราบน้ำมัน

Special Project Title High Efficiency Sorbent Derived from Natural Rubber and Carbon Fiber  
from Cattail Flowers for Emergent Removal of Oil Spill

นักศึกษา ชลกานต์ ทริกุลสวัสดิ์  
รวีพล โชตินพรัตน์

รหัสประจำตัว 58110015  
58110047

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2561  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิรักษ์ณ์ เอียดเอื้อ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.กษิตศ พนมสุวรรณ

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุธี ชูดีไพจิตร	
ผศ.ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง	
ผศ.ดร.อภิรักษ์ณ์ เอียดเอื้อ	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา  
วิศวกรรมวัสดุนาโนกับเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วันที่..... เดือน.....พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	วัสดุดูดซับประสิทธิภาพสูงจากยางธรรมชาติและเส้นใยคาร์บอนจากดอกธูปฤาษี
เพื่อ	กำจัดคราบน้ำมัน
นักศึกษา	นายชลกานต์ หริกกุลสวัสดิ์ นายรวิพล โชตินพรัตน์
ประจำตัว	58110015 58110047
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อภิสิทธิ์ชัย เอียดเอื้อ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.กชิติศ พนมสุวรรณ

### บทคัดย่อ

ปกติแล้วการกำจัดน้ำมันจะใช้แผ่นดูดซับน้ำมันซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์วัสดุดูดซับจากยางพารา และผสมคาร์บอนไฟเบอร์จากดอกธูปฤาษีซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติ มีราคาถูก และไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งแวดล้อม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการดูดซับน้ำมันที่รั่วไหลตามชายฝั่งทะเล โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชัน โดยขั้นตอนการทดลองมีดังนี้ นำดอกธูปฤาษีมาอบให้แห้ง ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ เพื่อทำการไฮโดรเทอร์มัล เมื่อทำการไฮโดรเทอร์มัลเสร็จ นำดอกธูปฤาษีมาอบเพื่อไล่น้ำออก แล้วทำปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน จากนั้นนำดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนในเซชันมาวิเคราะห์โครงสร้างและสัญญาณวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด ศึกษาพื้นที่ผิวโดยวิธี Brunauer-Emmett-Teller ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน บนพื้นผิวของตัวอย่างวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี เมื่อได้คาร์บอนไฟเบอร์จากดอกธูปฤาษีเงื่อนไขที่ดีที่สุดแล้ว จะนำมาเป็นส่วนประกอบของโพลีเมียงต่อไป ในกระบวนการขึ้นรูปโพลีเมียง โดยนำน้ำยางพาราผสมกับสารทำให้ยางคงรูป สารเร่งให้ยางคงรูป สารกระตุ้น สารตัวเติมต่างๆ บันกวนให้เข้ากัน นำไปนึ่งแล้วจึงอบไล่ของเหลวด้วยความร้อน จากนั้นนำไปทดสอบการดูดซับ จากผลการทดลองพบว่า โพลีเมียงพาราที่ผสมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 กรัม สามารถดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วในพื้นที่ผิวปกติและบนผิวน้ำได้ถึง 6.7 และ 5.9 เท่าโดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยโพลีเมียงพาราที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถดูดซับน้ำมันได้เนื่องจากสมบัติ พื้นที่ผิวและรูพรุน ความเป็นคาร์บอน (ไฮโดรคาร์บอน) และความไม่ชอบน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ: โฟมยางพารา, ไฮโดรเทอร์มัล, คาร์บอนโนเซชัน, คาร์บอนไฟเบอร์, ดอกธูปฤาษี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	High Efficiency Sorbent Derived from Natural Rubber and Carbon Fiber from Cattail Flowers for Emergent Removal of Oil Spill
Student	Chonlakarn Harikunsawad Rawipon Chotenoparat
Student ID	58110015 58110047
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Advisor	Asst. Prof. Dr. Apiluck Eiad-ua
Co-Advisor	Dr. Gasidit Panomsuwan

## ABSTRACT

Normally, the removal of oil will use the oil absorbent sheet, which has a relatively high price. This research aims to synthesize absorbent material from rubber and mixed carbon fiber from cattail flowers, which are natural materials, low cost and environmental-friendly. This material was applied to adsorb oil spills along the coast. The research study the effect of temperature and time of the hydrothermal carbonization process. By the first process, bring cattail flowers to dry and add into the reactor to the hydrothermal process. When the hydrothermal treatment is completed. Then bring the cattail flowers to rehydrate and into the carbonization process. The samples have been characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, Scanning electron microscope and Brunauer–Emmett–Teller were employed to characterize functional group, morphology and specific area ( $S_{BET}$ ) respectively. The best conditions will be used as a component of rubber foam in the process of forming rubber foam. The best conditions will be used as a component of rubber foam. The process of forming is bringing the latex mixed with the vulcanizing agent, accelerators, activators and fillers for combination then heated to forming foam and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rehydrate by heating. The experimental revealed the adsorption of foam that it was found that rubber foam mixed with 1 g of carbon fiber can absorb in normal and water surface up to 6.7 and 5.9 times by weight respectively. The synthetic rubber foam can adsorb oil due to properties: surface area, hydrocarbon and hydrophobic.

**Keywords:** Rubber foam, Hydrothermal, Carbonization, Carbon fiber, Cattail flower



# กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาและเรียบเรียงโครงการพิเศษวัสดุชุบเส้นใยคาร์บอนพอลิเมอร์ประสิทธิภาพสูงจากดอก  
ธูปฤาษีเพื่อการกำจัดคราบน้ำมันและสารเคมีนี้ สำเร็จลุล่วงได้ ผู้เขียนขอกราบ ขอบพระคุณ  
ผศ.ดร. อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และดร.กษิติศ พนมสุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่คอยดูแลให้คำปรึกษาตลอดการทำโครงการวิจัย และนายณภัฏ แก้วตระกูลชัย ที่  
คอยดูแลและให้คำปรึกษาด้านการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ ตลอดการทำโครงการวิจัย  
ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สำหรับ  
การเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ต่างๆและสถานที่ในการทำวิจัย สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณความรัก ความเข้าใจ และ  
กำลังใจอันอบอุ่นเสมอมาจากมารดา บิดา และครอบครัว ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการผลักดันให้โครงการพิเศษนี้  
สำเร็จไปได้ด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า เนื้อหาความรู้ จากโครงการพิเศษฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ท่าน  
ผู้อ่านไม่มากนักน้อย สำหรับคุณงามความดีที่ เกิดขึ้นจากโครงการพิเศษเล่มนี้ ข้าพเจ้าขอใช้บูชาคุณแก่มารดา  
บิดา ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชลกานต์ หริกุลสวัสดิ์  
รวีพล โชตินพรัตน์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XII
_Toc12258346	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	4
1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.4 สมมติฐานงานวิจัย.....	6
1.5 ขอบเขตการดำเนินการ.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 รูปลูกาซี.....	7
2.1.1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์รูปลูกาซี.....	7
2.1.2. ประโยชน์ของรูปลูกาซี.....	8
2.2 ยางพารา.....	9
2.2.1. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR).....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล้วต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2 ประโยชน์ของน้ำยางพาราในอุตสาหกรรม .....	12
2.2.3 โฟมยางพารา.....	13
2.2.3.1 Dunlop process .....	13
2.2.3.2 Talalay process .....	13
2.2.4 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตภัณฑ์จากยางพารา.....	13
2.3 ชีวมวล .....	14
2.3.1 ประเภทของชีวมวล .....	15
2.3.1.1 ชีวมวลที่ประเภทไม้.....	15
2.3.1.2 ชีวมวลที่ประเภทไม่ใช่ไม้.....	15
2.3.1.3 ชีวมวลที่ประเภทอื่นๆ .....	16
2.3.2 องค์ประกอบสารชีวมวล .....	16
2.3.2.1. เซลลูโลส (cellulose).....	16
2.3.2.2. เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose).....	17
2.3.2.3. ลิกนิน (lignin).....	17
2.3.2.4. แป้ง.....	18
2.3.3. คุณสมบัติของชีวมวล .....	18
2.3.4. พลังงานที่ได้จากชีวมวล .....	19
2.3.4.1. ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value, HHV).....	19
2.3.4.2. ค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value, LHV).....	20
2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล .....	21
2.5 กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	วิธีการแยกสลายด้วยความร้อน.....	21
2.5.2	กลไกการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน .....	22
2.5.3	ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน .....	23
2.5.4	ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน .....	24
2.6	กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization).....	25
2.6.1	อุณหภูมิ.....	25
2.6.2	อัตราความร้อน.....	25
2.6.3	ตัวกลางของปฏิกิริยา.....	26
2.6.4	ธรรมชาติของชีวมวล.....	26
2.6.5	การเปลี่ยนแปลงภายในชีวมวลในปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน .....	26
2.6.6	การกระตุ้น (Activation).....	27
2.6.6.1	การกระตุ้นทางกายภาพ .....	27
2.6.6.2	การกระตุ้นทางเคมี.....	28
2.7	กระบวนการโซลโวเทอร์มัล (Solvothermal).....	29
2.8	การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).....	30
2.9	กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) .....	31
2.9.1	กลไกของกระบวนการดูดซับการดูดซับ (Adsorption).....	31
2.9.2	ประเภทของการดูดซับ.....	32
2.9.2.1	การดูดซับทางกายภาพ .....	33
2.9.2.2	การดูดซับทางเคมี .....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.3. ไอโซโทมการดูดซับ.....	34
2.10 ปัญหาน้ำมันรั่วในทะเล .....	36
2.10.1 ตัวอย่างเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหล.....	36
2.10.2 ผลกระทบจากน้ำมันรั่วไหล .....	38
2.10.3 กระบวนการในการกำจัดน้ำมัน.....	43
2.10.3.1 วิธีการทางกายภาพ .....	43
2.10.3.2 วิธีการทางเคมี.....	44
2.10.3.3. วิธีการทางชีวภาพ .....	44
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
2.12 เทคนิคและเครื่องมือวัด .....	48
2.12.1 การวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันโดยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	48
2.12.1.1 การเตรียมสารตัวอย่าง .....	49
2.12.1.2 ประเภทของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	50
2.12.2 การวัดพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนโดยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET).....	51
2.12.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) .....	55
2.12.3.1 หลักการทำงานของ SEM.....	56
2.12.3.2 ส่วนประกอบของ SEM .....	57
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	59
3.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยคาร์บอนจากดอกกุหลาบ.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	60
3.4 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตรจากดอกกุหลาบ.....	75
3.5 การเตรียมวัสดุดูดซับโพลีเมอร์คาร์บอนไฟเบอร์จากดอกกุหลาบ.....	77
ขั้นรูปวัสดุดูดซับโพลีเมอร์คาร์บอนไฟเบอร์จากดอกกุหลาบ.....	77
3.6 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ .....	79
3.7 การทดสอบการดูดซับน้ำมัน.....	80
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล .....	82
4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล .....	82
4.2 ผลของอุณหภูมิของกระบวนการคาร์บอนไอเซน .....	86
4.3 การทดสอบการดูดซับน้ำมัน.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา.....	99
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	99
5.2 แนวทางการพัฒนา.....	100
บรรณานุกรม .....	101
ประวัติผู้เขียน.....	107

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
2.1 ส่วนประกอบของน้ำยาง.....	11
2.2 คุณสมบัติของน้ำยางธรรมชาติ .....	11
2.3 คุณสมบัติต่างๆของซีวมวลแต่ละชนิด.....	20
2.4 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี .....	33
2.5 ความถี่ในการเกิดน้ำมันรั่วไหลที่พบตามแนวชายฝั่งและทะเลในประเทศไทย .....	41
3.1 สูตรการผสมสารเคมียางในการผลิตโฟมยาง.....	77
4.1 พื้นที่ผิวของดอกธูปฤาษีและดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (160, 180 และ 200°C) เป็นเวลา 8 h และผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 900°C.....	83
4.2 พื้นที่ผิวของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เวลาแตกต่างกัน (4, 8, 12 และ 24h) ที่อุณหภูมิ 180°C และผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 900°C.....	84
4.3 พื้นที่ผิวของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขเดียวกัน (180°C 8h) และผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (300, 500, 700 และ 900°C) เป็นเวลา 2 h.....	87
4.4 ค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วของโฟมยางพาราชนิดต่างๆ ที่เงื่อนไขการดูดซับบนพื้นผิวปกติ.....	92
4.5 ค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วของโฟมยางพาราชนิดต่างๆ ที่เงื่อนไขการดูดซับบนพื้นผิวน้ำ.....	96
4.6 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนโฟมดูดซับน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้น (Contact angle).....	99

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะภายนอกของรูปถ่าย.....	7
2.2 ลักษณะของต้นยางพารา.....	9
2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำยาง.....	11
2.4 ผลิตรubberยางพาราในอุตสาหกรรม.....	12
2.5 วัฏจักรคาร์บอนแบบปิดของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	15
2.6 โครงสร้างทางเคมีของชีวมวล.....	18
2.7 กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์.....	32
2.8 ไอโซเทอมการดูดซับ [44].....	35
2.9 น้ำมันรั่วไหลในทะเล.....	36
2.10 เขตความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหลในน่านน้ำไทย.....	42
2.11 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	51
2.12 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ.....	52
2.13 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้นๆ.....	52
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์.....	53
2.15 เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน.....	55
2.16 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง.....	56
2.17 แผนภาพขององค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	58
3.1 ถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Autoclave).....	60
3.2 ภาชนะที่เป็นเทฟลอน (Teflon).....	60
3.3 ภาชนะใส่สารสำหรับเผา (Boat).....	61
3.4 เตาเผาสารแบบแนวนอน (Horizontal Tube Furnace).....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ตู้อบ (Oven).....	61
3.6 เครื่องปั่นผสมอาหาร (Food Mixer).....	62
3.7 ฟอยล์อะลูมิเนียม (Aluminium Foil).....	62
3.8 ปีกเกอร์ (Beaker).....	62
3.9 กระบอกลม (Cylinder).....	63
3.10 ช้อนตักสาร (Spatula).....	63
3.11 หลอดดูดสาร (Chemical Suction Tube).....	63
3.12 ถังแก๊สไนโตรเจน (N <sub>2</sub> gas).....	64
3.13 เตาเผาแบบสี่เหลี่ยม (Furnace box).....	64
3.14 ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (Crucible).....	65
3.15 เครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer).....	65
3.16 แม่พิมพ์ (Mold).....	66
3.17 ดอกธูปฤๅษี (Cattail Flower).....	66
3.18 น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water).....	66
3.19 น้ำยางพารา (Latex).....	67
3.20 น้ำมันเครื่องใช้แล้ว (Used motor oil).....	67
3.21 โพแทสเซียมโอเลต (Potassium Oleate).....	67
3.22 กำมะถัน (Sulfur).....	68
3.23 แซตดีอีซี (ZDEC).....	68
3.24 แซตเอ็มบีที (ZMBT).....	68
3.25 วิงสเตย์แอล (Wingstay L).....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO).....	69
3.27 ดีพีจี (DPG).....	69
3.28 เอสเอสเอฟ (SSF).....	70
3.29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	70
3.30 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์.....	71
3.31 Sorption Apparatus.....	71
3.32 Contact angle.....	72
3.33 Analytical balance.....	72
3.34 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมเส้นใยคาร์บอน.....	73
3.35 แผนภาพแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโพลีเมียง.....	74
3.36 นำดอกธูปฤาษีที่แกะแล้ว มาอบไล่ความชื้น.....	75
3.37 ดอกธูปฤาษีผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออนในภาชนะที่เป็นเทฟลอน.....	76
3.38 (A) นำภาชนะที่เป็นเทฟลอนใส่ในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Reactor) และ (B) นำถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลเข้าตู้อบ (Oven).....	76
4.1 กราฟ FT-IR ของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (a) 160°C, (b) 180°C, และ (c) 200°C ที่เวลาเท่ากัน (8h).....	82
4.2 กราฟ FT-IR ของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เวลาแตกต่างกัน (a) 4h, (b) 8h, (c) 12h และ (d) 24h ที่อุณหภูมิ 180°C.....	82
4.3 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (A) Pure, (B) 160°C, (C) 180°C และ (D) 200°C เป็นเวลา 8h.....	85
4.4 กราฟ FT-IR ของ (A) การทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันในอากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (a) 300°C, (b) 350°C, (c) 400°C, (d) 450°C และ (e) 500°C เป็นเวลา 2h.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.5 กราฟ FT-IR ของ (A) การทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (a) 500°C, (b) 600°C, (c) 700°C, (d) 800°C และ (e) 900°C เป็นเวลา 2h.....	86
4.6 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของดอกรูปถ้วยที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (A) 160°C, (B) 180°C และ (C) 200°C แต่ใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเท่ากัน 800°C 2h .....	88
4.7 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของดอกรูปถ้วยที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันในอากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (A) 300°C, (B) 350°C, (C) 400°C, (D) 450°C และ (E) 500°C ใช้เวลา 2h.....	88
4.8 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของดอกรูปถ้วยที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน(A) 500°C, (B) 600°C, (C) 700°C, (D) 800°C และ (E) 900°C ใช้เวลา 2h.....	89
4.9 ภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) (ตามมาตรฐาน ASTM F 726-06) ของโพลียาพารา (A) โพลียาพาราที่ยังไม่ผ่านการเติม Carbon Fiber, (B) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber 0.5 g, (C) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber 1 g , (D) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber 1.5 g และ (E) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber 2 g.....	90
4.10 ภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) (ตามมาตรฐาน ASTM F 726-06) ของโพลียาพารา (A) โพลียาพาราที่ยังไม่ผ่านการเติม Carbon Fiber, (B) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber , (C) โพลียาพาราที่เติม Carbon Black (D) โพลียาพาราที่เติม Activated Carbon จำนวน 1 g และ (E) หลังจากทดสอบการดูดซับเป็นเวลา 15 นาที .....	91
4.11 ภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) (ตามมาตรฐาน ASTM F 726-06) ของโพลียาพาราบนน้ำ (A) โพลียาพาราที่ยังไม่ผ่านการเติม Carbon Fiber, (B) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber 0.5 g, (C) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber 1 g , (D) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber 1.5 g และ (E) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber 2 g .....	94
4.12 ภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) (ตามมาตรฐาน ASTM F 726-06) ของโพลียาพารา (A) โพลียาพาราที่ยังไม่ผ่านการเติม Carbon Fiber, (B) โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber , (C) โพลียาพาราที่เติม Carbon Black (D) โพลียาพาราที่เติม Activated Carbon เป็นจำนวน 1 g.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากการใช้น้ำมันและสารเคมีที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีการขนส่งน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจก่อให้เกิดเหตุการณ์น้ำมันและสารเคมีรั่วไหลในท้องทะเลและตามชายฝั่ง จึงทำให้เกิดปัญหาอย่างร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมบริเวณใกล้เคียง รวมทั้งส่งผลกระทบต่อทั้งภาคเศรษฐกิจและสังคม ใช้เวลายาวนานในการกำจัดและฟื้นฟู ในปี พ.ศ. 2553 ได้เกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลในเม็กซิโกมากถึง 4.9 ล้านบาร์เรล ถือเป็นหนึ่งในเหตุการณ์การรั่วไหลของน้ำมันดิบที่เลวร้ายที่สุดในประวัติศาสตร์โลก ชายฝั่งของสหรัฐอเมริกาปนเปื้อนด้วยคราบน้ำมันดิบ เป็นแนวยาวกว่า 1,728 กิโลเมตร สร้างความเสียหายให้กับระบบนิเวศน์ และอุตสาหกรรมประมงอย่างประเมินค่าไม่ได้ และบริเวณแนวชายฝั่งยังต้องเผชิญกับปัญหาคราบน้ำมันตกค้างอยู่ ในประเทศไทยเขตที่มีความเสี่ยงสูงในการเกิดเหตุน้ำมันรั่วอยู่นั้นอยู่ทั้งเขตทะเลอันดามันและทะเลอ่าวไทยบริเวณจังหวัดชลบุรี ระยอง และฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นพื้นที่อุตสาหกรรม มีการขนถ่ายน้ำมันทั้งบริเวณท่าเทียบเรือและกลางทะเล โดยตามสถิติของกรมควบคุมมลพิษได้บันทึกว่าโดยเฉลี่ยแล้วจะเกิดเหตุน้ำมันรั่วในทุกๆปี และในแต่ละครั้งย่อมสร้างความเสียหายหลากหลายประการ และใช้เวลาในการเยียวยาค่อนข้างนาน ซึ่งในช่วงกลางปี พ.ศ. 2556 ได้เกิดเหตุภัยพิบัติทางทะเลที่เกิดเป็นข่าวใหญ่พบเห็นได้ตามหน้าสื่อเกือบทุกประเภท เหตุภัยพิบัตินี้ได้ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยเป็นอย่างมากนั้นคือเหตุการณ์น้ำมันดิบรั่วไหลลงทะเลในฝั่งอ่าวไทย โดยเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556 ท่อน้ำมันในเรือบรรทุกน้ำมันดิบ 50,000-70,000 ลิตร [1] ของบริษัท พีทีที โกลบอลเคมิคอล จำกัด (มหาชน) เกิดการแตกขึ้น ทำให้น้ำมันดิบรั่วออกมากลางทะเลบริเวณท่าเทียบเรือนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดไปทางตะวันออกเฉียงเหนือ 20 กิโลเมตร คลื่นลมทะเลที่แรงทำให้น้ำมันดิบถูกพัดจนคราบน้ำมันเข้ามาถึงบริเวณอ่าวพร้าว เกาะเสม็ด จังหวัดระยอง [2] หาดทรายที่เคยขาวใสดุ๊กปกคลุมด้วยคราบน้ำมันหนา 30-40 เซนติเมตร และยาวเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตรเลียบชายหาด [3] เกาะเสม็ดเป็นสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญแห่งหนึ่งของประเทศ ด้วยเหตุที่มีหาดทรายสีขาวและน้ำทะเลที่ใสจึงสามารถดึงดูดนักท่องเที่ยวได้ตลอดทั้งปี แต่เมื่อเกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่วจึงทำให้จำนวนนักท่องเที่ยวลดลงเป็นอย่างมาก นอกจากด้านเศรษฐกิจแล้ว ผลกระทบที่เกิดขึ้นยังเกิดกับสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ สัตว์ทะเลต้องตายไป อีกทั้งแนวปะการังกว่า 30% ยังถูก ปกคลุมไปด้วยคราบน้ำมัน โขดหินก็ถูกเคลือบไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คราบน้ำมันจนเป็นสีตามองไม่เห็นความสวยที่เคยเป็นมาก่อน ทั้งนี้หน่วยงานต่างๆได้เข้ามามีส่วนร่วมในการกำจัดคราบน้ำมัน ซึ่งวิธีการกำจัดน้ำมันดิบนั้นมีด้วยกัน 3 ทางใหญ่ๆ ได้แก่ วิธีการทางกายภาพ วิธีการทางเคมี และวิธีการทางชีวภาพ [4, 5] โดยวิธีทางกายภาพมีอยู่ด้วยกันหลาย วิธีการ เช่น การเผาทำลายซึ่งวิธีนี้จะลดการแพร่กระจายของคราบน้ำมันได้ แต่จะทำให้เกิดของเสียในอากาศเป็นจำนวนมาก การใช้แรงงานอาทิ การใช้แผ่นดูดซับ วิธีการนี้นิยมใช้เป็นอย่างมากเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานที่ผ่านการฝึกฝน แต่มีข้อเสียคือแผ่นซับน้ำมันมีราคาค่อนข้างสูง และแรงงานจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันตัวอย่างเหมาะสมเพื่อความปลอดภัย ส่วนวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้คือวิธีการใช้สารลดแรงตึงผิวโดยการฉีดพ่นด้วยเครื่องบิน ซึ่งจะทำให้คราบน้ำมันกระจายตัวไม่เกาะกันเป็นก้อน ไม่ตกเป็นตะกอน และมีความเป็นพิษน้อยลง ก่อนจะถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่กินคราบน้ำมันต่อไป แต่วิธีการใช้สารเคมีนั้นอาจเกิดผลเสียจากการตกค้างของสารเคมี ทำให้มีความเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ทางผู้จัดทำเล็งเห็นว่าวัสดุชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับ และเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่มีราคาถูก ไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งแวดล้อมนั้นคือ ฐุปลาชี

ฐุปลาชีเป็นวัชพืชที่มีปริมาณมาก ปกคลุมหลายพื้นที่ในประเทศไทย และยังเป็นปัญหาสำคัญในด้านสิ่งแวดล้อมและระบบชลประทาน ก่อให้เกิดความรำคาญแก่ผู้อยู่อาศัยบริเวณนั้นแต่ในอีกแง่หนึ่งได้กลายเป็นพืชที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย [6, 7] สามารถช่วยบำบัดน้ำเสียตามแหล่งต่างๆ และสามารถเจริญเติบโตได้ดีแม้จะอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำเสียตามชุมชนหรือตามแหล่งน้ำจากโรงงาน และยังทำให้น้ำเสียในบริเวณนั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น มีศักยภาพในการลดค่าความขุ่นต่างของน้ำ ช่วยปรับเปลี่ยนสีของน้ำที่ไม่พึงประสงค์ให้ต่ำลง และช่วยลดความเป็นพิษในน้ำได้ และในปัจจุบันได้มีการนำฐุปลาชีไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ เช่นการผลิตกระดาษ การผลิตเครื่องจักสานจากใบฐุปลาชี กำจัดคราบน้ำมัน ใช้เป็นเชื้อเพลิง และนำมาทำเป็นปุ๋ย เป็นต้น ต้นฐุปลาชีเป็นพืชล้มลุกที่มีอายุหลายปี มีเขตการกระจายพันธุ์ในประเทศไทยทั่วทุกภาค พบในที่ลุ่มทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม ถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ในทวีปยุโรปและอเมริกา [8,9] ปัจจุบันแพร่หลายไปทั่วโลก มีประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วและจะเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชุ่มน้ำ วัชพืชยังเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่มนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมมากมาย ผลเสียที่เกิดจากฐุปลาชีต่อสภาพแวดล้อมมีดังนี้ เมื่อต้นฐุปลาชีเจริญขึ้นในแหล่งน้ำตื้นอย่างมากและตายลง ทำให้เกิดน้ำเสียส่งกลิ่นเหม็นไปรอบๆสร้างความรำคาญแก่ผู้สัญจรและผู้อยู่อาศัยบริเวณนั้น ซึ่งทำการฟื้นฟูพื้นที่น้ำเสียนั้นๆได้ยาก เนื่องจากฐุปลาชีเป็นต้นที่มีลักษณะสูงเรียวยาว และมักขึ้นอย่างหนาแน่นปกคลุมเนื้อ

ที่ได้หลายๆไร่ ทำให้มีลักษณะเป็นที่ที่รกรุงรัง และสกปรกทำให้สัตว์มีพิษเข้าไปอาศัยอยู่ได้จึงเป็นที่อยู่

ของสัตว์มีพิษ หรือสัตว์ที่เป็นอันตรายแก่มนุษย์เนื่องจากรูปภาชีสามารถเจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้รวดเร็วอย่างน่าเหลือเชื่อ กินพื้นที่ได้กว้างในเวลาเพียงไม่กี่เดือน จึงแย่งธาตุอาหารที่จำเป็นในดินไป ทำให้ไม่สามารถเพาะปลูกได้ดีเท่าที่ควร ทำให้เกิดปัญหาในการใช้สอยที่ดินทำกิน เมล็ดของรูปภาชีนั้นมีขนาดเล็กมากและมีมากมายมหาศาล และที่สำคัญ สามารถปลิวกระจัดกระจายไปตามที่ต่างๆ จึงเกิดการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว เมื่อแก่ดอกรูปภาชีจะแตกผลที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีปริมาณมากมายมหาศาลปลิวไปตามกระแสลม ทำให้เกิดเป็นมลพิษทางอากาศ และสร้างความรำคาญแก่ผู้พักอาศัยบริเวณนั้น เนื่องจากรูปภาชีเป็นวัชพืชที่มีปริมาณมากในประเทศไทย และยังเป็นปัญหาสำคัญในด้านสิ่งแวดล้อม และระบบชลประทานตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงคิดหาวิธีในการกำจัดวัชพืชโดยไม่ทำให้เกิดมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม และที่สำคัญดอกรูปภาชีมีสมบัติที่เป็นเส้นใยนาโน และมีความไม่ชอบน้ำ (ไม่มีขี้) [10] ซึ่งมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (น้ำมัน) จึงเกิดการรวมตัวเข้าหากันได้ง่าย ทางผู้จัดทำจึงได้เล็งเห็นแนวทางในการใช้ดอกรูปภาชีเพื่อกำจัดน้ำมันดิบที่เกิดจากการรั่วไหล โดยการใช้ดอกรูปภาชีเป็นตัวดูดซับน้ำมัน แต่ทั้งนี้ก็ต้องมีการปรับปรุงสมบัติของดอกรูปภาชีให้มีความไม่ชอบน้ำ (ไม่มีขี้) มากขึ้น เพื่อที่จะได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้มากยิ่งขึ้น โดยจะใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนเซชันในการปรับปรุงสมบัติของดอกรูปภาชี [11-13] เนื่องจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นกระบวนการที่ง่าย ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำ ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [12, 13] โดยมีกลไกในการทำปฏิกิริยา คือ เป็นการให้โมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) และความร้อน เข้าไปทำลายพันธะ (Break bond) ของลิกนิน, เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบในดอกรูปภาชี [14] ทำให้มีความไม่ชอบน้ำ (ไม่มีขี้) มากขึ้น และในขณะเดียวกันโครงสร้างน้ำจะเข้าไปเปิดรูพรุน (Pore) ในดอกรูปภาชี ส่งผลให้พื้นที่ผิว (Surface area) มากขึ้นเมื่อเทียบกับดอกรูปภาชีปกติ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับ น้ำมันมากยิ่งขึ้น หลังจากที่ได้เส้นใยคาร์บอนจากดอกรูปภาชีแล้ว จะนำมาขึ้นรูปกับพอลิเมอร์นั้นคือ ยางพารา

ยางพารา เป็นหนึ่งในผลผลิตหลักทางการเกษตรของประเทศไทย โดยเมื่อปี พ.ศ. 2556 ราคายางแผ่นดิบเฉลี่ยที่ 75.55 บาท ซึ่งเมื่อเทียบกับปัจจุบัน ราคายางแผ่นดิบเฉลี่ยอยู่ที่ 38.27 บาท (เมื่อวันที่ 2 พ.ค. 2562) สังเกตได้ว่าราคายางตกลงอย่างมาก ทำให้เกษตรกรชาวสวนยางพารามีรายได้ที่ลดน้อยลง ผู้จัดทำจึงเล็งเห็นแนวทางในการแก้ปัญหาราคายางตกต่ำ โดยการนำยางพารามาแปรรูปเป็นส่วนประกอบในวัสดุดูดซับน้ำมัน วิธีการนำยางพารามาประยุกต์ใช้งานคือ นำน้ำยางพารามาผสมกับเส้นใยคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น แล้วไปปั่นกวนให้เข้ากัน จากนั้นเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพื่อสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นมา เนื่องจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมีข้อดีคือ การกระจายตัว

ของอนุภาคใกล้เคียงกัน มีความบริสุทธิ์สูง และใช้อนุมูลในการสังเคราะห์ต่ำ และเป็นกระบวนการที่ง่าย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาปัจจัยของอนุมูลและเวลาที่มีผลต่อการสังเคราะห์เส้นใยคาร์บอนจากดอกรูปถาษี โดยอาศัยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชัน
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนเส้นใยคาร์บอนจากรูปถาษีต่อพอลิเมอร์ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุดูดซับคาร์บอนพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการโซโวเทอร์มัล
3. เพื่อศึกษาผลของประสิทธิภาพในการดูดซับและการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุดูดซับเส้นใยคาร์บอนพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนงานวิจัย	เดือน									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน กระบวนการเตรียมวัสดุดูดซับพอลิเมอร์ การใช้งานในด้าน การดูดซับ น้ำมัน จากนั้นวางแผนดำเนินการวิจัย										
2. ทำการทดลองโดยนำดอกธูปฤาษีมาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล										
3. วิเคราะห์ผลของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล										
4. นำเส้นใยคาร์บอนจากธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาทำการทดลองการสังเคราะห์วัสดุดูดซับเส้นใยคาร์บอนด้วยกระบวนการโซโวลเทอร์มัล										
5. วิเคราะห์ผลของวัสดุดูดซับเส้นใยคาร์บอนพอลิเมอร์										
6. นำวัสดุดูดซับเส้นใยคาร์บอนพอลิเมอร์มาทำการทดลองการดูดซับ การนำกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมัน										
7. สรุป อภิปรายผลการทดลอง										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 สมมติฐานงานวิจัย

ถ้าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลต่อโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอน ทำให้มีพื้นที่ผิวและความไม่ชอบน้ำที่มากขึ้น และถ้าผสมเส้นใยคาร์บอนกับยางพารา จะทำให้ได้เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีรูพรุน ค่าพื้นที่ผิว ความไม่ชอบน้ำมากขึ้น และมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่งผลให้เกิดการดูดซับน้ำมันได้ดียิ่งขึ้น

#### 1.5 ขอบเขตการดำเนินการ

งานวิจัยนี้จะจำกัดขอบเขตของงานในส่วนการวิจัยพัฒนาการทดลอง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดอก ฐูปถาษี โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน เจือปนที่จะทำการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน ศึกษาผลของอัตราส่วนเส้นใยคาร์บอนจากฐูปถาษีต่อพอลิเมอร์ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุดูดซับคาร์บอนพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการโซโวลเทอร์ ศึกษาผลของประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมัน และการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุดูดซับเส้นใยคาร์บอนพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถพัฒนาลักษณะความไม่ชอบน้ำ (ไม่มีขั้ว) และความเป็นรูพรุนของดอกฐูปถาษีที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

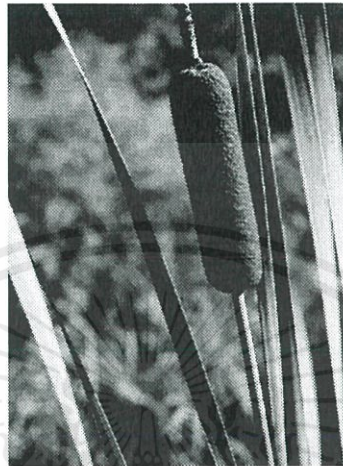
1. สามารถสังเคราะห์วัสดุดูดซับเส้นใยคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีรูพรุนระดับนาโนเมตร
2. สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนจากดอกฐูปถาษีให้มีความไม่มีขั้วหรือความไม่ชอบน้ำมากขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. พัฒนาวัสดุดูดซับที่ดี จากเทคโนโลยีต้นทุนต่ำ
4. สร้างคุณค่าและเพิ่มมูลค่าให้แก่ชีวมวล และยางพาราในประเทศไทย
5. ลดการนำเข้าวัสดุดูดซับจากต่างประเทศ
6. สร้างองค์ความรู้ในการแก้ปัญหาเมื่อเกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# แนวคิด ทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 รูปถ่าย



<https://pixabay.com/th/photos>

รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะภายนอกของรูปถ่าย

รูปถ่าย ชื่อวิทยาศาสตร์: *Typha angustifolia* L. หรือกกช้าง ชื่ออื่นๆ คือ กกรูป หล้า สลอบหลวง เพื่อ ปรีอเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่เป็นไม้ล้มลุกชนิดหนึ่งในวงศ์ Typhaceae อายุหลายปี มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรปและอเมริกาชื่อสามัญ Bulrush, Cattail, Cat-tail, Elephant grass, Flag, Narrow-leaved Cat-tail, Narrowleaf cattail, Lesser reedmace, Reedmace tule

#### 2.1.1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์รูปถ่าย

ต้นรูปถ่าย มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรปและอเมริกา จัดเป็นไม้ล้มลุกมีอายุหลายปี เหง้ากลม แหว่งขึ้นเป็นระยะสั้น ๆ ลำต้นตั้งตรง มีความสูงประมาณ 1.5-3 เมตร เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชุ่มน้ำ ขยายพันธุ์ด้วยผลหรือเมล็ด พบขึ้นตามหนองน้ำ ลุ่มน้ำทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม ตามทะเลสาบหรือริมคลอง รวมไปถึงตามที่โล่งทั่ว ๆ ไป มีเขตการกระจายพันธุ์ทั่วโลกในเขตร้อนและในเขตอบอุ่น สำหรับในประเทศไทยสามารถพบได้ทั่วทุกภูมิภาคใบรูปถ่าย ใบเป็นใบเดี่ยว มีกาบใบเรียงสลับในระนาบเดียวกัน ลักษณะใบเป็นรูปแถบ มีความกว้างประมาณ 1.2-1.8 เซนติเมตรและยาวประมาณ 50-120 เซนติเมตร แผ่นใบด้านบนมีลักษณะโค้งเล็กน้อยเพราะมีเซลล์หุ่ยตัวคล้ายฟองน้ำหมุนอยู่กลางใบ ส่วนด้านล่างของใบแบนดอกรูปถ่าย ออกดอกเป็นช่อแบบเชิงลด ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดอกเพศผู้มีความยาวประมาณ 8-40 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่อประมาณ 0.2-0.7 เซนติเมตร และมีใบประดับประมาณ 1-3 ใบ หลุดร่วงได้ ส่วนช่วงดอกเพศเมียจะมีความยาวประมาณ 5-30 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่อประมาณ 0.6-2 เซนติเมตร มักแยกออกจากส่วนดอกเพศผู้ด้วยส่วนของก้านช่อดอกที่เป็นหมันที่มีความยาวประมาณ 2.5-7 เซนติเมตร ดอกมีขนาดเล็ก ไม่มีกลีบเลี้ยงและกลีบดอก เกสรเพศผู้ส่วนมากแล้วจะมี 3 อัน มีขนขึ้นล้อมรอบ ก้านเกสรเพศผู้จะสั้น มีอับเรณูยาวประมาณ 1.5-2 มิลลิเมตร ส่วนดอกเพศเมียจะมีใบประดับย่อยเป็นรูปเส้นด้าย มีรังไข่เป็นรูปกระสวย ก้านของรังไข่เรียวและยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร มีขนยาว ส่วนก้านเกสรเพศเมียจะยาวประมาณ 1-1.5 มิลลิเมตร มีขนสั้นกว่าก้านของรังไข่ ยอดเกสรมีลักษณะเป็นรูปแถบหรือรูปใบหอก และยังสามารถออกดอกได้ตลอดทั้งปี

### 2.1.2. ประโยชน์ของรูปฤาษี [15]

รูปฤาษีเป็นพืชที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายจากส่วนประกอบต่างๆของทั้งลำต้นได้ทุกส่วนดังนี้

- 1) ยอดอ่อนใช้รับประทานได้ทั้งสดและทำให้สุก แบ่งที่ได้จากลำต้นใต้ดินและรากสามารถใช้บริโภครูปฤาษีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติอาจนำมาใช้เป็นอาหารสำหรับสัตว์เลี้ยงที่กินพืชได้ [17, 18, 20]
- 2) ใบรูปฤาษีมีความยาวและเหนียวจึงนิยมนำมาใช้มุงหลังคา และสามารถนำมาใช้สานตะกร้า ทำเสื่อ ทำเชือก [16-18]
- 3) ช่อดอกแห้งสามารถนำมาใช้เป็นไม้ประดับ ส่วนในประเทศอินเดียจะใช้ก้านของช่อดอกมาทำปากกา [16, 18]
- 4) เยื่อของต้นรูปฤาษีสามารถนำมาใช้ทำกระดาษและทำใยเทียมได้ โดยมีเส้นใยมากถึงร้อยละ 40 มีความชื้นของเส้นใย 8.9%, ลิกนิน 9.6%, ไซ 1.4%, เถ้า 2%, เซลลูโลส 63%, และมีเอมิเซลลูโลส 8.7%
- 5) เส้นใยที่ได้จะมีสีขาวหรือสีน้ำตาลอ่อน สามารถนำมาใช้ทอเป็นผ้าเพื่อใช้สำหรับแทนผ้าใยหรือขนสัตว์ได้ [17, 18]
- 6) ต้นรูปฤาษีมีระบบรากที่ดี จึงช่วยป้องกันการพังทลายของดินตามชายน้ำได้ [17, 18]
- 7) ชากของรูปฤาษีสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุคลุมดินสำหรับไม้ยืนต้นตามสวนผลไม้ต่าง ๆ เพื่อช่วยลดการสูญเสียน้ำจากผิวดิน และช่วยลดการชะล้างหน้าดินจากน้ำฝนได้ [17, 18]
- 8) ต้นรูปฤาษีสามารถช่วยกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียในที่ลุ่มต่อไร่ได้สูงถึง 400 กิโลกรัมต่อปี และยังสามารถดูดเก็บกักธาตุโพแทสเซียมต่อไร่ได้สูงถึง 690 กิโลกรัมต่อปี [17, 18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) รุปรูปร่างอาจช่วยทำให้วัฏจักรของแร่ธาตุอาหารในดินสมบูรณ์ขึ้น เพราะมีแร่ธาตุอาหารหลายชนิด เมื่อต้นรุปรูปร่างตายลงหรือถูกกำจัดก็จะเกิดการย่อยสลาย ทำให้แร่ธาตุอาหารกลับสู่ดิน ทำให้ดินมีความสมบูรณ์ สามารถทำการเพาะปลูกได้ [18]

10) รุปรูปร่างสามารถช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดินได้ เพราะมีแร่ธาตุอาหารหลากหลายชนิด การไถกลบเศษซากของต้นรุปรูปร่างก็เท่ากับเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุลงในดิน และจะเป็นประโยชน์แก่พืชที่ปลูกโดยตรง [18]

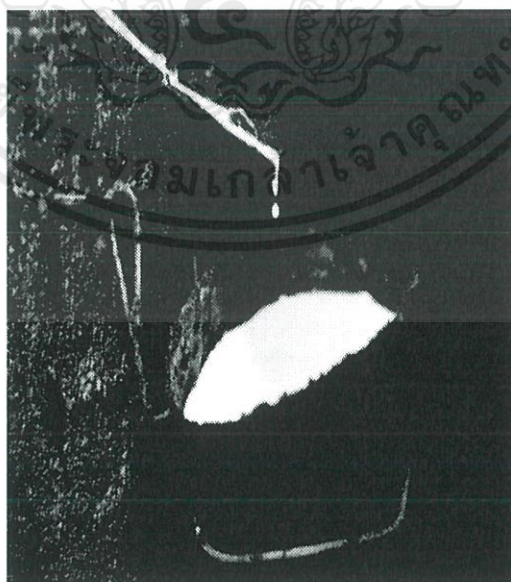
11) ใช้เป็นปุ๋ยพืชสดหรือใช้ทำปุ๋ยหมักบำรุงดินได้ [18]

12) ใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิง โดยต้นรุปรูปร่างมีปริมาณของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตค่อนข้างสูง กากที่เหลือจากการสกัดเอาโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตออกแล้วใช้แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนย่อยจะให้แก๊สมีเทนซึ่งใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงได้ [18]

13) ดอกของต้นรุปรูปร่างสามารถใช้กำจัดคราบน้ำมันได้เป็นอย่างดี โดยน้ำหนักของดอกต้นรุปรูปร่าง 100 กรัม สามารถช่วยกำจัดคราบน้ำมันได้มากกว่า 1 ลิตร [19]

14) ต้นรุปรูปร่างสามารถช่วยบำบัดน้ำเสียตามแหล่งต่าง ๆ และสามารถเจริญเติบโตได้ดี แม้จะอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำเสียตามชุมชนหรือตามแหล่งน้ำจากโรงงานต่าง ๆ และยังทำให้น้ำเสียในบริเวณนั้นมีคุณภาพที่ดีที่ขึ้น มีศักยภาพในการลดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำ ช่วยปรับเปลี่ยนสีของน้ำที่ไม่พึงประสงค์ให้จางลง และช่วยลดความเป็นพิษในน้ำได้ [20]

## 2.2 ยางพารา



<https://www.scbeic.com/th/detail/product/3256>

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของต้นยางพารา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางพารา เป็นไม้ยืนต้น มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำแอมะซอน ประเทศบราซิลและประเทศเปรู ในทวีปอเมริกาใต้ โดยชาวพื้นเมืองเรียกว่า "เกาซู" แปลว่า ต้นไม้ร้องไห้ จนถึงปี พ.ศ. 2313 โจเซฟ 프리สต์ลีย์ พบว่ายางสามารถนำมาลบลอยดำของดินสอได้ จึงเรียกว่ายางลบหรือตัวลบ (rubber) ซึ่งเป็นศัพท์ใช้ในประเทศอังกฤษและประเทศเนเธอร์แลนด์เท่านั้น ศูนย์กลางของการเพาะปลูกและซื้อขายยางในอเมริกาใต้แต่ดั้งเดิมอยู่ที่รัฐปารา (Pará) ของประเทศบราซิล ยางชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า ยางพารา

### 2.2.1. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

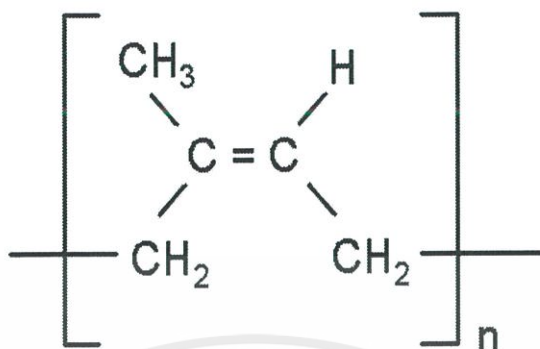
สายพันธุ์ต้นยางพาราที่นำมาปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นสายพันธุ์ *Hevea Braziliensis* มีถิ่นกำเนิดจากทวีปอเมริกาใต้ประเทศบราซิล โดยส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดคือน้ำยาง น้ำยางสด (Latex) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวเมื่อทำการกีดออกมาจากต้นยางพาราจะมีส่วนประกอบคือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (เนื้อยางแห้ง) และส่วนที่ไม่ใช่ยาง

เนื้อยางแห้ง หมายถึง ปริมาณของเนื้อยางที่อยู่ในน้ำยาง ตามปกติในน้ำยางจะมีเนื้อยางแห้ง ประมาณ 25-45% เนื้อยางแห้งนี้เองที่เป็นวัสดุมหัศจรรย์ ที่มนุษย์นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการดำรงชีพ จนกลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับชีวิตประจำวัน ของสังคมมนุษย์ในปัจจุบัน

น้ำยาง มีความหนาแน่น 0.98 มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (PH) ประมาณ 6.8 เมื่อตรวจดูในห้องปฏิบัติการจะพบว่า มีอนุภาคขนาดต่างๆ กันแขวนอยู่ในของเหลว อนุภาคเหล่านี้จะมีประจุเป็นลบ ผลักกันอยู่ตลอดเวลา ทำให้อนุภาคเหล่านั้น แขนวลอยและคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้จนกว่าจะมีสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ มารบกวน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้ให้น้ำยางเสีย เสถียรภาพ และจับตัวกันเป็นก้อน [21]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene ( $C_5H_8$ ) โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 15,000 -20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมี

ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และ ความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง [22]



รูปที่ 2.3 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำยาง

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของน้ำยาง

สารประกอบ	ร้อยละ
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	22-46%
ปริมาณเนื้อยางแห้ง	25-45%
สารจำพวกโปรตีน	1.5%
สารพวกเรซิน	2.0%
คาร์โบไฮเดรต	1.0%
สารอนินทรีย์	0.5%

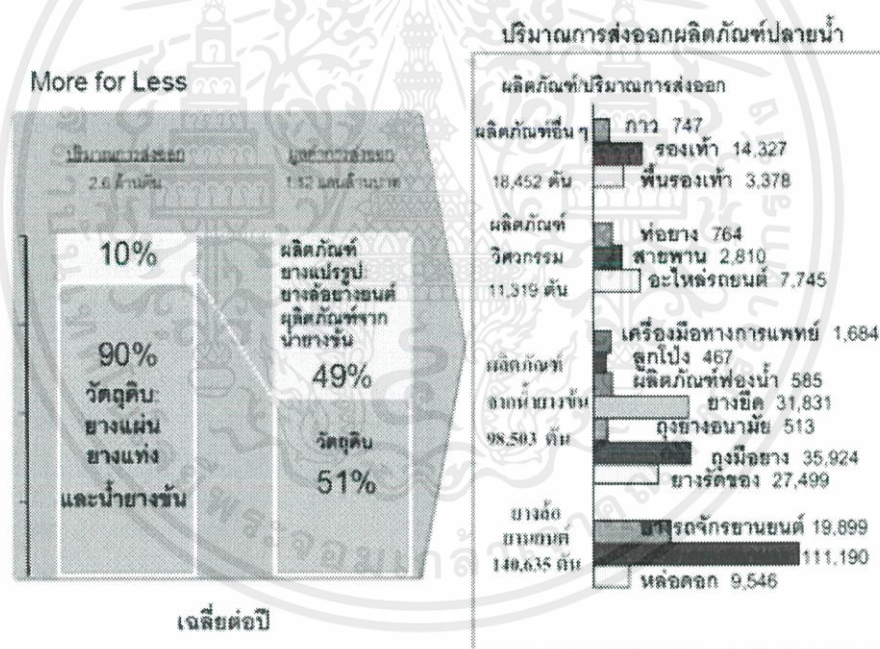
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของน้ำยางธรรมชาติ

ข้อเด่น	ข้อด้อย
ทนการเสียดสี	ไม่ทนต่อความร้อน
รับแรงกระแทก	เสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด
ยืดหยุ่นตัวดี	อายุการใช้งานต่ำ
ทนความร้อนได้ -20°C ถึง 80°C	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ประโยชน์ของน้ำยางพาราในอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยางเป็นอุตสาหกรรม พื้นฐานที่มีความสำคัญ มากต่อระบบ เศรษฐกิจของ ประเทศไทย โดยสามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจและมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง ในปี 2552 ที่ผ่านมา ประเทศไทยส่งออกยางพาราในรูปแบบยางแผ่นดิบ มูลค่า 146,263 ล้านบาท และผลิตภัณฑ์ยาง 152,800 ล้านบาท การเพาะปลูกยางพารา เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญทั้งนี้ไทยเป็น หนึ่งในไม่กี่ประเทศในโลกที่สามารถเพาะปลูกยางได้ด้วยความสะดวกเหมาะสมของสภาพภูมิอากาศ พื้นที่ เป็นต้น ทำให้ผลผลิตยางของไทยมี ปริมาณและคุณภาพที่ดี สามารถนำมาเป็นผลิตภัณฑ์ยาง และ นับวันจะเป็นที่ต้องการในตลาดโลกเพิ่มมากขึ้น เรื่อย ๆ ประกอบกับหากพิจารณามูลค่าและปริมาณ การส่งออกของประเทศจะพบว่ายางและผลิตภัณฑ์ยางมี มูลค่าอยู่ในลำดับต้นๆ และมีอัตราการ เติบโตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องก่อให้เกิดการจ้างงานในภาคเกษตรกรกว่า 6 ล้านคน และแรงงานใน อุตสาหกรรมกว่า 200,000 คน [23]



<http://www.smi.or.th/index.php/sample-sites-7/category/7-aec?download=21:2012->

09-12-08-57-19

รูปที่ 2.4 รูปแสดงผลิตภัณฑ์ยางพาราในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.3 โฟมยางพารา

โฟมยางพาราเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นรูพรุนเหมาะที่ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก เบาะนั่ง ที่นอน หมอน ฟองน้ำ เป็นต้น หลักการสำคัญของการผลิตยางฟองน้ำคือ การทำให้น้ำยางเกิดฟองของอากาศหรือของแก๊สต่างๆ แล้วทำให้ ฟองยางคงรูปหรือการวัลคาไนซ์ ด้วยสารเคมีและความร้อน ในปัจจุบันเทคนิคการผลิตยางฟองน้ำ แบ่งออกได้เป็น 3 วิธีคือ เทคนิคแบบ Dunlop process เทคนิคแบบ Talalay process และสุดท้ายเทคนิคคือ Revertex process

### 2.2.3.1 Dunlop process

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ทำการผลิตจากน้ำยางพาราธรรมชาติโดยการตีฟองน้ำยางธรรมชาติให้เกิดฟองหรือแก๊สแล้วผสมสารเคมีเข้าไปทำการวัลคาไนเซชันให้ฟองหรือแก๊สที่ดีได้เกิดคงรูปแล้วนำไปเทใส่แม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ไปทำการนึ่งหรืออบเพื่อทำให้ยางสุกจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำร้อนเพื่อล้างสารเคมีที่ตกค้างในยางออก ข้อดีของวิธีการนี้สามารถได้โฟมยางพาราที่มีความหนาแน่นมากได้และใช้ต้นทุนในการผลิตไม่สูง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ข้อเสียคือโฟมที่ได้ไม่ค่อยมีความสม่ำเสมอ

### 2.2.3.2 Talalay process

เป็นเทคนิคที่คล้ายกับวิธีการแบบ Dunlop กล่าวคือมีการตีฟองแล้วผสมสารเคมีเหมือนกันแต่ต่างกันคือแม่พิมพ์ที่เป็นระบบปิด ในระบบสุญญากาศโฟมยางพาราที่ได้มีความหนาแน่นเท่ากันมีความนิ่มแต่ไม่สามารถทำให้ความหนาแน่นของโฟมยางพาราเท่ากับวิธี Dunlop และมีการใช้ต้นทุนของการผลิตที่สูงไม่นิยมนำมาใช้ผลิตในอุตสาหกรรมมากเท่าวิธี Dunlop [24]

## 2.2.4 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตภัณฑ์จากยางพารา

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟมยางนั้นมีหลักการที่สำคัญคือต้องใช้ในน้อยที่สุดเพื่อการใช้งานที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อมโดยมีสารเคมีที่ทำหน้าที่ต่างๆดังนี้

**สารที่ช่วยเพิ่มความเสถียร** เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่รักษาความเป็นเบสของน้ำยาง เพื่อไม่ให้น้ำยางเสียสภาพ ดังนั้นสารที่ช่วยเพิ่มความเสถียรจึงควรเป็นสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ที่นิยมใช้คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือที่อยู่ในรูปของสบู่กรดไขมัน เช่น โพแทสเซียม ลอเรต, โพแทสเซียม โอลิเอต, แอมโมเนียม ลอเรต และแอมโมเนียม คาซิเนต โดยเฉพาะกลุ่มพวกแอมโมเนียมที่มีกลิ่นที่ฉุนมากดังนั้นควรใส่อย่างพอดีและระมัดระวัง

สารวัลคาไนซ์ เป็นสารเคมีที่สำคัญที่สุดในการทำผลิตภัณฑ์ยาง โดยจะทำให้เกิด การเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางเป็น 3 มิติ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆในตัวอย่างให้ดียิ่งขึ้น สารวัลคาไนซ์ที่นิยมจะเป็นพวก กำมะถัน (S) โดยกำมะถันจะสามารถใช้ได้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

สารกระตุ้นปฏิกิริยา เป็นสารที่เติมไปเล็กน้อยเพื่อเร่งปฏิกิริยาสารกลุ่มนี้มีหน้าที่เร่งอัตราวัลคาไนซ์ของยางให้เร็วขึ้น รวมถึงยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาที่นิยมใช้ก็คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เมื่อเติมเข้าไปจะทำให้ยางมีความหนืดมากเป็นสารที่เติมในขั้นตอนท้ายๆของการผสมสาร

สารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป เป็นสารที่เป็นตัวช่วยสารวัลคาไนซ์ถ้ามีแค่สารวัลคาไนซ์ทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่ช้ามาก และต้องใช้ในจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีสารที่เข้ามาช่วยเร่งปฏิกิริยาเพิ่ม ถ้ามีสารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูปจะช่วยลดเวลา ลดอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ และยังปรับปรุงสมบัติให้กับผลิตภัณฑ์

สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่ป้องกันออกซิเจน ( $O_2$ ) ในอากาศ เพราะยางธรรมชาติง่ายต่อการที่ออกซิเจนจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมสภาพ จึงมีผลทำให้ช่วยยืดอายุการใช้งาน ในงานวิจัยนี้จะใช้ 50% Wingstay-L

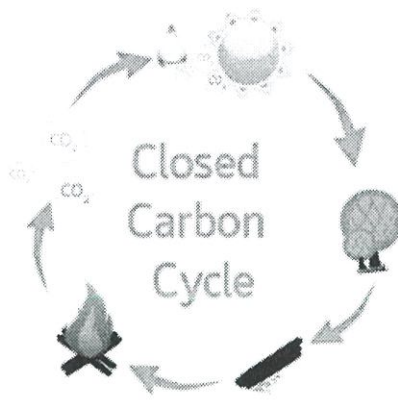
สารตัวเติม (additive) เป็นสารที่เติมลงไปในน้ำยาง เพื่อให้ผลกับผลิตภัณฑ์หลายอย่างขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ที่จะนำไปใช้ เช่นเสริมความแข็งแรงในยางหรือเพิ่มคุณสมบัติอย่างอื่นที่ยางพาราไม่มี สารตัวเติมที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์เช่น ผงคาร์บอน

สารที่ทำให้เกิดเจล เป็นสารที่เติมลงไปในน้ำยางเพื่อให้เกิดเจล โดยเจลนั้นคือสารกึ่งของเหลวและกึ่งของแข็ง สารส่วนมากใช้ในผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำ ที่ใช้กันก็คือ Sodiumsilicofluoride (SSF) [25]

## 2.3 ชีวมวล [26]

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีการใช้กันมานานแล้วตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ เช่น การนำเศษกิ่งไม้แห้งมาก่อเป็นกองแล้วจุดไฟเพื่อให้ความร้อนและแสงสว่างของมนุษย์ในสมัยที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเศษกิ่งไม้แห้งนี้ถือเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดหนึ่ง ชีวมวลนั้นยังนับเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งด้วยเนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถหาได้และเกิดทดแทนขึ้นในธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเป็นวัฏจักรไปเรื่อยๆ จากการใช้งานและเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นทำให้วัฏจักรการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาความร้อนเนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นระบบปิด (Closed Carbon Cycle or Zero Carbon Emission Cycle) ในที่นี้เราจะแบ่งประเภทของชีวมวลออกเป็น 6 ประเภทจากแหล่งกำเนิดของชีวมวลนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<https://ienergyguru.com/2015/08/-biomass/>

## รูปที่ 2.5 แสดงวัฏจักรคาร์บอนแบบปิดของเชื้อเพลิงชีวมวล

### 2.3.1 ประเภทของชีวมวล [27]

ชีวมวลสามารถจำแนกได้ประเภทได้ 3 ประเภทได้แก่

#### 2.3.1.1 ชีวมวลที่ประเภทไม้

ชีวมวลที่เกิดจากการเพาะปลูกซึ่งชีวมวลประเภทนี้มีการปลูกขึ้นมาแล้วเหลือจากใช้ในจุดประสงค์หลักของการเพาะปลูก เช่น ปลูกเพื่อเป็นอาหารแก่คนหรือสัตว์ หรือปลูกขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลโดยตรง ชีวมวลประเภทนี้ เช่น ปาล์มน้ำมัน, ข้าวโพด, ถั่วเหลือง และ มันสำปะหลัง เป็นต้น ชีวมวลที่เกิดขึ้นหลังการเกิดไฟไหม้ป่า ชีวมวลชนิดนี้จะเกิดขึ้นหลังมีการเกิดไฟไหม้ป่าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นประจำ โดยชีวมวลประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นพวกเศษกิ่งไม้และลำต้นของต้นไม้ที่หลงเหลือจากไฟไหม้ป่าและสุดท้ายชีวมวลที่เกิดขึ้นในป่าและอุตสาหกรรมป่าไม้ ชีวมวลประเภทนี้สามารถหาได้ในป่า เช่น เศษใบไม้ กิ่งไม้ที่หักจากต้นไม้ ต้นไม้ที่ตายไปแล้ว หรือแม้กระทั่งของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ เช่น ขี้เลื่อย และ ปีกไม้ เป็นต้น

#### 2.3.1.2 ชีวมวลที่ประเภทไม่ใช่ไม้

ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากของเสียทางการเกษตร ชีวมวลประเภทนี้จะเกิดขึ้นระหว่างการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปพืชผลทางการเกษตร เช่น แกลบ, ฟางข้าว, กะลาปาล์มและ กาบ ชีวมวลจากมูลสัตว์ ชีวมวลประเภทนี้เป็นสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ เช่น มูลวัว มูลแพะ มูลไก่ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้จะมีความชื้นที่สูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.3 ชีวมวลที่ประเภทอื่นๆ

เป็นชีวมวลที่ไม่จัดอยู่ในสองประเภทข้างต้นชีวมวลจากขยะชุมชน ชีวมวลประเภทนี้คือขยะที่เราทิ้งกันทุก ๆ วัน ซึ่งสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ขยะชุมชน (Municipal Solid Waste)

จากประเภทของชีวมวลที่ได้กล่าวมาข้างต้นชีวมวลแต่ละประเภทแต่ละชนิดจะมีธาตุองค์ประกอบแตกต่างกันคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน เมื่อเราเราจะนำไปใช้เราพิจารณาองค์ประกอบของธาตุหรือ พิจารณาประเภทของชีวมวล เมื่อเรานำชีวมวลไปจะได้ใช้งานชีวมวลนั้นให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ยกตัวอย่างเช่น เอาดอกธูปฤาษีมาเผาเป็นเชื้อเพลิงแทนที่จะนำไม้มาเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น เมื่อเรานำพืชหรือชีวมวลมาเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อเผาไหม้ให้ได้ “คาร์บอน” คาร์บอนที่ได้ในที่นี้เราเอาไปใช้งานต่างกันถ้าเราได้คาร์บอนจากดอกธูปฤาษีเราจะนำไปเป็นตัวดูดซับ แต่ถ้าเราได้คาร์บอนจากไม้เราจะนำไปเป็นเชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่าชีวมวลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายแนวทางไม่ว่าจะเป็น เชื้อเพลิง วัสดุดูดซับ ก๊าซหุงต้ม เหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล และกระบวนการที่เราสังเคราะห์ขึ้นแล้วไปประยุกต์ใช้ให้เกิดผล ยกตัวอย่างเช่นเราต้องการเชื้อเพลิงเราสามารถเลือกชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันได้ และเนื่องจากต้นทุนพลังงานจากชีวมวลซึ่งก็คือต้นทุนจากชีวมวล จะถูกกว่าเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียม คือ น้ำมัน จึงมีการนำชีวมวลต่างๆมาใช้แทนน้ำเตาเพื่อลดต้นทุน อีกทั้งยังช่วยสนับสนุนให้เกษตรกรไทยนำเศษวัสดุที่เหลือใช้จากเกษตร ซึ่งแต่เดิมไม่เห็นคุณค่าของมันนำมาสร้างรายได้เพิ่มทั้งยังช่วยลดปัญหาภาวะเรือนกระจกได้อีกด้วย เพราะเป็นการนำพืชกลับมาใช้ประโยชน์เรื่อยๆไม่มีวันหมด เป็นแหล่งพลังงานที่เกิดจากสะสม

### 2.3.2 องค์ประกอบสารชีวมวล

สารชีวมวลนั้นมีหลากหลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบต่างกัน แต่จะมีองค์ประกอบข้างต้นที่เหมือนกันได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน องค์ประกอบเหล่านี้จะอยู่ในพืชเหล่านี้ แล้วพืชแต่ละชนิดย่อยองค์ประกอบเหล่านี้ไม่เหมือนกัน เช่น ต้นอ้อยจะมีเซลลูโลสมากกว่าต้นข้าว เป็นต้น องค์ประกอบของสารชีวมวลได้แก่

#### 2.3.2.1. เซลลูโลส (cellulose)

เป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ประเภทโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (glucose) มาต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่งปีต้า-1,4 ( $\beta$ -1,4) เป็นสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวมากกว่า 2,000 โมเลกุล เซลลูโลสเป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืช เช่น ผัก ผลไม้ และ เมล็ดธัญพืช โดยอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และเพกทินเซลลูโลสจัดเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ชนิดที่ไม่ละลายในน้ำ และไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ และสัตว์กระเพาะเดี่ยว

### 2.3.2.2. เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

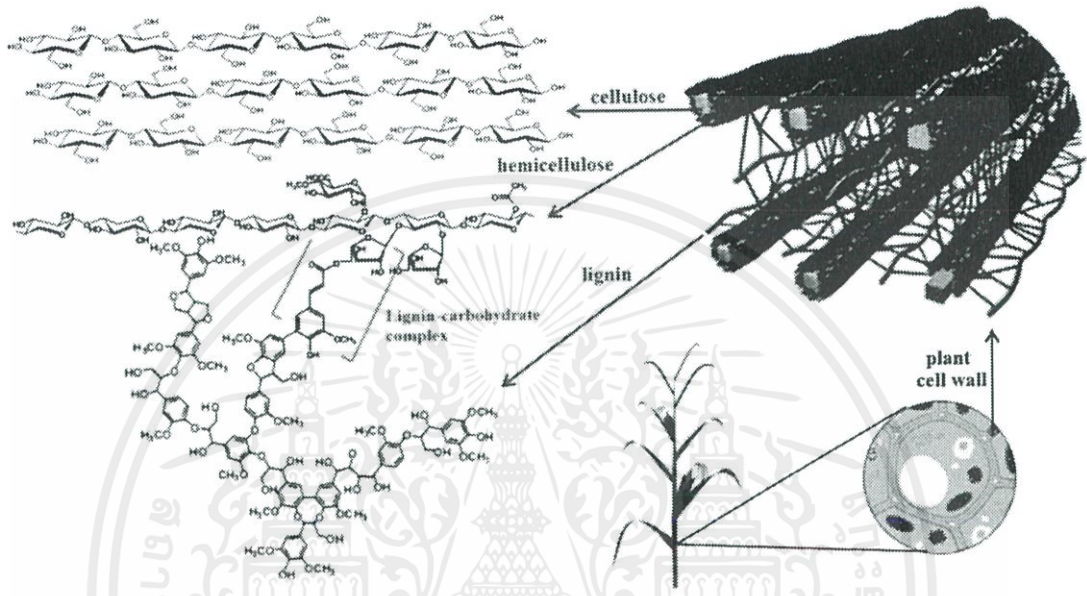
เป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส เป็น heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีน้ำตาลไซโลส (xylose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง บีตา (1-4) เป็นโซ่หลัก อาจมีน้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแล็กโทส (galactose) หรือกลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลักด้วยและมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือโซ่แขนงได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) กรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) เฮมิเซลลูโลส จัดเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ละลายน้ำ ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว สามารถละลายได้ในสารละลายต่างเจือจาง สมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) และแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange) เมื่ออยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของมนุษย์ แหล่งของเฮมิเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ของพืชที่อยู่ร่วมกับเซลลูโลสพบมาก ในผัก และผลไม้

### 2.3.2.3. ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรง อยู่ร่วมกับเซลลูโลส (cellulose) และ hemicellulose เป็นส่วนประกอบของเปลือก ชังหรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของราก ลำต้น และจะถูกสร้างจากส่วนโคนต้นไปสู่ยอด เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น ปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย พบมากในผลไม้สุกมากกว่าผลไม้ดิบ

### 2.3.2.4. แป้ง

แป้ง คือผงละเอียดที่มี สตาร์ช (starch) เป็นส่วนประกอบหลัก ได้จากการนำส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เมล็ด ราก หัว ไม้บด และยังมีส่วนประกอบอื่น เช่น โปรตีน (protein) ลิพิด (lipid) รวมอยู่ด้วย หากมีกระบวนการสกัด โปรตีนและ ลิพิดออกเหลือแต่ส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรต มักเรียกว่า starch



<https://www.degruyter.com/view/j/gps.2017.6.issue-1/gps-2016-0017/gps-2016-0017.xml>

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของชีวมวล

### 2.3.3. คุณสมบัติของชีวมวล

คุณสมบัติของชีวมวลเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการเลือกชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในด้านใดหรือการเปรียบเทียบชีวมวลบ่งบอกว่าสมบัติต่างๆเป็นอย่างไร ซึ่งคุณสมบัติของชีวมวลมีดังนี้ คือ ความชื้น (moisture) เถ้า (ash) ไอรระเหย (volatile matter) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

#### ปริมาณความชื้น (Moisture, M)

ปริมาณความชื้นในชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากในการนำชีวมวลไปใช้เป็น เชื้อเพลิง ถ้าชีวมวลมีปริมาณความชื้นมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง เป็นอย่างมาก ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในชีวมวลจึงมีความจำเป็นและ สำคัญมาก ปริมาณความชื้นในชีวมวลวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่หายไป หลังการอบชีวมวลให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะทำการอบชีวมวลในเตาอบไฟฟ้าจนกว่าชีวมวลจะแห้ง หรือน้ำหนักของชีวมวลคงที่น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือความชื้นจะระเหยออกมาจากชีวมวลระหว่างที่ทำการอบแห้ง ปริมาณความชื้นในชีวมวลจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของชีวมวล ปริมาณความชื้นในชีวมวลประเภทไม้มีตั้งแต่ร้อยละ 25 – 65 ในขณะที่ถ้าเป็นชีวมวลประเภทกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย (sludge) จะมีปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 90

### ปริมาณเถ้า (Ash, A)

ถ้าชีวมวลมีปริมาณเถ้ามากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ชีวมวลบางชนิด เช่น ทะลายปาล์มเปล่าซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมในเถ้ามากจะก่อให้เกิดปัญหาเถ้าหลอม (slagging) ในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำได้นอกจากนี้ในเถ้าของชีวมวลบางชนิด เช่น แกลบจะมีปริมาณซิลิกาเป็นจำนวนมาก ซึ่งซิลิกานี้จะไปทำให้ท่อไอน้ำร้อนในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำเกิดการฉีกขาดและผุกร่อน เป็นต้น

### ปริมาณไอระเหย (Volatile Matter, VM)

ปริมาณไอระเหยในชีวมวลเป็นน้ำหนักที่หายไปหลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวล ภายใต้สภาวะที่กำหนด คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยไม่ให้ชีวมวลสัมผัสกับอากาศ ไอระเหยจะเกิดขึ้นจากการกลั่นสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส (pyrolysis)

### ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon, FC)

ปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างชีวมวลหลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน

## 2.3.4. พลังงานที่ได้จากชีวมวล

เป็นพลังงานที่ได้จากการสังเคราะห์ชีวมวลจะอยู่ในรูปแบบของปริมาณความร้อน คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง เป็นปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ชีวมวลอย่างสมบูรณ์ ค่าความร้อนเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเชื้อเพลิง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าในชีวมวล ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีอยู่ 2 ค่า คือ ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value, LHV)

### 2.3.4.1. ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value, HHV)

ค่าความร้อนสูง (HHV) คือ ค่าความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง bomb calorimeter ที่สภาวะมาตรฐาน ค่านี้จะบอกศักยภาพของชีวมวลแต่ละชนิดโดยเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกเผาไหม้ในภาชนะปิดที่แช่อยู่ในน้ำ หลังจากที่เชื้อเพลิงชีวมวลเผาไหม้จะคายความร้อนให้แก่ น้ำ ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเราสามารถหาปริมาณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลได้จากการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำ

### 2.3.4.2. ค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value, LHV)

คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่พิจารณาว่าไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่ได้ควบแน่นเป็นของเหลว โดยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงบางส่วนจะถูกใช้ ในการระเหยน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ให้อยู่ในสถานะไอน้ำ

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชีวมวลแต่ละชนิด

คุณสมบัติชีวมวล ต่างๆ	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	Higher Heating Value (kJ/kg)	Lower Heating Value (kJ/kg)
แกลบ (Rice Husk)	12.00	12.65	56.46	18.88	14,755	13,517
ฟางข้าว (Rice Straw)	10.00	10.39	60.70	18.90	13,650	12,330
ขานอ้อย (Bagasse)	50.73	1.43	41.98	5.86	9,243	7,368
ใบอ้อย (Cane Trash)	9.20	6.10	67.80	16.90	16,794	15,479
ไม้ยางพารา (Parawood)	45.00	1.59	45.70	7.71	10,365	8,600
เส้นใยปาล์ม (Palm Fiber)	38.50	4.42	42.68	14.39	13,127	11,400
กะลาปาล์ม (Palm Shell)	12.00	3.50	68.20	16.30	18,267	16,900
ทะลายปาล์ม (Empty Fruit Bunch)	58.60	2.03	30.46	8.90	9,196	7,240
ต้นปาล์ม (Palm Trunk)	48.40	1.20	38.70	11.70	9,370	7,556
ทางปาล์ม (Palm Leaf)	78.40	0.70	16.30	4.60	3,908	1,760
ซังข้าวโพด (Corn cob)	40.00	0.90	45.42	13.68	11,298	9,615
ลำต้นข้าวโพด (Corn Stalk)	41.70	3.70	46.46	8.14	11,704	9,830
เหง้ามันสำปะหลัง (Tapioca Rhizome)	59.40	1.50	31.00	8.10	7,451	5,494
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark)	60.00	2.44	28.00	9.56	6,811	4,917

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล [28]

วิธีการเตรียมชีวมวลด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มัลเป็นกระบวนการสังเคราะห์ชีวมวลโดยใช้น้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยาไปปรับเปลี่ยนโครงสร้างของชีวมวล โดยอาศัยความร้อนและความดันในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 160-200 องศาเซลเซียสในถังปฏิกรณ์ (ระบบปิด) และจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นๆ ไปจนถึงหลายชั่วโมง โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลของดอกรูปไข่จะทำให้โมเลกุลน้ำไปทำปฏิกิริยากับดอกรูปไข่ โมเลกุลน้ำจะเข้าไปทำลายองค์ประกอบของสารชีวมวล เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ให้พันธะของสารชีวโมเลกุลสั้นลง จากพันธะที่ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวๆ เพื่อให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงอีกทั้งเป็นการกำจัดโมเลกุลของน้ำออกไปช่วยในการเพิ่มจำนวนคาร์บอนและคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำให้กับดอกรูปไข่ ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารเคมีและน้ำมัน หรือกล่าวอีกในหนึ่งการไฮโดรเทอร์มัลเป็นการปรับปรุงโครงสร้างใหม่ให้พันธะของดอกรูปไข่สั้นลง เมื่อพันธะสั้นโมเลกุลก็จะเสถียรมากยิ่งขึ้น [29]

## 2.5 กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน [30]

เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงหรือต่อกันเป็นสายโซ่ที่สั้นลง เช่น ชีวมวล พลาสติก ยางที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน น้ำมัน และ ก๊าซไม่กลั่นตัว โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500-900 องศาเซลเซียส ในที่ๆปราศจากออกซิเจน แต่การแยกสลายด้วยความร้อนเป็นกระบวนการแบบปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ต้องใช้ความร้อนเป็นพลังงานเพื่อแยกองค์ประกอบต่างๆซึ่งจะระเหยกกลายเป็นไอออกจากสารอินทรีย์ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่มีคุณค่ามาก โดยถ่านที่เกิดจากดอกรูปไข่ที่เราได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนี้จะมีคุณสมบัติที่มีความเป็นเส้นใย มีความเป็นคาร์บอน และมีรูพรุนมาก

### 2.5.1 วิธีการแยกสลายด้วยความร้อน

ในการเผาชีวมวลมีการแบ่งวิธีการแยกสลายด้วยความร้อนจะแบ่งตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้เป็น 2 วิธีดังนี้

#### การแยกสลายด้วยความร้อนแบบปกติ (slow pyrolysis)

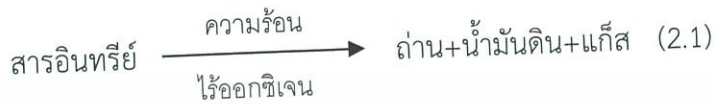
โดยจะให้อัตราความร้อนน้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่ออนาทีและใช้อุณหภูมिन้อยกว่า 500 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นน้ำมันดิน (tar) หรือถ่านไม้ (charcaol) วิธีเป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเป็นเวลานานโดยใช้เวลา 1 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การแยกสลายด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว (fast pyrolysis)

โดยจะให้อัตราความร้อนน้อยกว่า 60-1000 องศาเซลเซียสต่ออนาทีและใช้อุณหภูมิในช่วง 400-1000 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นน้ำมัน ของแข็ง และ แก๊สตามลำดับจะได้น้ำมันมากที่สุดโดยใช้เวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อยกว่า 2 วินาที

### ปฏิกิริยามูลฐาน



### ปฏิกิริยารอง



## 2.5.2 กลไกการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน

1. ช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pre-pyrolysis) ในช่วงอุณหภูมิจาก 120-200 องศาเซลเซียสเกิดการทำให้พันธะในโมเลกุลของวัตถุดิบบางส่วน และเริ่มมีอนุมูลอิสระ (Free radical) เกิดขึ้น รวมทั้งยังมีการเกิดหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydro peroxide group) ขึ้น ถ้าชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส) เป็นเวลานาน โครงสร้างภายในของชีวมวลจะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกสลายตัวด้วยความร้อนวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ดังนั้นขั้นตอนของช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน จึงมีความสำคัญต่อกระบวนการทั้งหมด

2. ช่วงการสลายส่วนที่เป็นของแข็งเป็นขั้นตอนหลักของกระบวนการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เร็วมากเป็นขั้นตอนให้เกิดผลิตภัณฑ์โดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 300-600 องศาเซลเซียส ในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้น โมเลกุลที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่เป็นสายโซ่ยาวจะเกิดการแตกตัวของพันธะ C-C, C-S และ C-O พร้อมกับการเกิดสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) สารผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะดึงไฮโดรเจนจากสารอื่นแล้วกลับตัวเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ถ่านโค้กในขณะที่ถ่านนี้ไม่เกิดปฏิกิริยา ก็จะกลายเป็นถ่านชาร์ไปในที่สุดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำมันทาร์จะผ่านกระบวนการแตกตัว (Cracking) และถูกทำให้เป็นแก๊สซึ่งผลิตภัณฑ์มีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไป

### 2.5.3 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. แก๊ส : ในการทำลายพันธะด้วยความร้อนแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 53 โดยน้ำหนัก คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 39 โดยน้ำหนัก สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 6.7 โดยน้ำหนักและไฮโดรเจนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ตามสภาวะเงื่อนไขที่อยากให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมาก จะมีการเติมอากาศลงไปในปฏิกิริยาด้วย เพื่อให้คาร์บอนบางส่วนเกิดการเผาไหม้ทำให้ได้แก๊สจากการเผาไหม้มากขึ้น

2. ของเหลว : ของเหลวที่ได้จากการทำลายพันธะด้วยความร้อนมีชื่อเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ “Pyrolysisoil” หรือ “Bio – oil” ของเหลวนี้นี้ประกอบด้วยน้ำ และสารอินทรีย์ซึ่งควบแน่นออกมาจากกระบวนการนอกจากนี้อาจจะประกอบด้วยเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งหลุดออกจากกระบวนการได้ โดยการระเหย สำหรับสภาวะเงื่อนไขจะไม่มีอากาศหรือออกซิเจนเลยในระบบ และมีการให้ความร้อนกับระบบในอัตราที่สูง และเร็ว จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ เป็นน้ำมันชีวภาพมากที่สุด เรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวเป็นส่วนใหญ่นี้ว่า การแยกสลายด้วยความร้อน สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาเพื่อผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้า และสามารถใช้ในกังหันแก๊สเพื่อผลิตไฟฟ้าได้ ในอนาคตสามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ต้องอยู่กับที่เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้หรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการปรับปรุงเพื่อผลิตเป็นน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซลและน้ำมันอากาศยาน

3. ของแข็ง : ของแข็งที่ได้จากกระบวนการทำลายพันธะด้วยความร้อนนี้จะเรียกว่า ชาร์ (Char) ซึ่งชาร์จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคาร์บอน ซึ่งเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมคือ ไม่มีการให้อากาศหรือออกซิเจนเลยในระบบและมีอัตราการให้ความร้อนอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊สคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชาร์จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมากเรียกระบวนการการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเพื่อให้ได้ของแข็งเป็นส่วนใหญ่นี้ว่า “คาร์บอนเซชัน (Carbonization)” ชาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนเซชันควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (Uniformly black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและซี้ถ้าชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนเซชันนี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะว่าการทำให้เกิดชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนเซชัน หรือ ก็คือการทำกรกระตุ้นนั่นเอง

#### 2.5.4 ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนสามารถนำไปผลิตเป็นพลังงานได้หลากหลายสถานะ คือ ผลิตพลังงานในรูปแบบของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

ผลิตพลังงานในรูปแบบของแข็ง เช่น ถ่านเป็นการผลิตพลังงานในรูปแบบของแข็ง ถ่าน มักถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้สำหรับผลิตความร้อน ไอน้ำ และไฟฟ้า ถ่านที่ผลิตจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องปฏิกรณ์ภายในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนจะให้ค่าความร้อนที่ต่างกันตามชนิดของชีวมวลที่นำมาใช้ทำถ่าน ถ่านที่เกิดจากจากเผาถ่านสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ด้วยเช่นกันคือการนำไปใช้ในการผลิตซีเมนต์ นอกจากนี้ถ่านยังสามารถช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน

พลังงานในรูปแบบของเหลว เช่น น้ำมัน จากกระบวนการแยกสลายด้วยร้อนจะมีสมบัติอยู่หลากหลายประการ เช่น มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา กล่าวคือ มีค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนืด และการกลั่นลำดับส่วนใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ในขณะที่คุณค่าเชิงความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันเตา แต่มีปริมาณซัลเฟอร์น้อยกว่าน้ำมันเตา ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานใหม่ได้ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้อย่างไร้น้ำมันที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันก่อนเนื่องจากมีค่าความเป็นกรดที่สูงจะทำให้ไปกัดกร่อนเครื่องยนต์ มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นเถ้าที่สูงอาจจะไปอุดตันเครื่องยนต์ มีจุดติดไฟยากมีความหนืดที่สูง ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่ได้จากกระบวนการนี้

พลังงานในรูปแบบแก๊ส เช่น แก๊สไม่กลั่นตัวค่าความร้อนของแก๊สที่ได้มีค่าสูงเทียบได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิดสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

## 2.6 กระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization) [31-34]

เป็นกระบวนการไพโรไลซิสวิธีหนึ่ง โดยจะให้ความร้อนในที่ที่ปราศจากออกซิเจนแก่ชีวมวล จะทำให้ชีวมวลความเป็นคาร์บอนมากยิ่งขึ้นในอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีใช้อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 500-1000 องศาเซลเซียสทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาเป็นของแข็งลักษณะเป็นถ่านสีดำที่เรียกว่า ชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์ (Tar) และส่วนที่เป็นแก๊ส ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันจัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันจะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการทำปฏิกิริยา ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัสดุในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ จากนั้นจะได้ชาร์ (คุณสมบัติใกล้เคียงกับคาร์บอน) ที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยมีตัวแปรในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันคือ

### 2.6.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และแก๊สที่ได้เพิ่มมากขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัสดุ ดังนั้น

### 2.6.2 อัตราความร้อน

อัตราความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหย การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้คาร์บอนที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าคาร์บอนที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เพราะคาร์บอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อทำการกระตุ้น สารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา

ตัวกลางของปฏิกิริยา (Medium of reaction) จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการ ไพรโอไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลางเช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณคาร์บอนที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่าทั้งยังช่วยลดความเป็นในกระบวนการคาร์บอนในเซชันอีกด้วยทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้น

### 2.6.4 ธรรมชาติของชีวมวล

ชีวมวลแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการทำปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน โดยชีวมวลที่แตกต่างกันอาจมีวิธีการกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อให้ได้คาร์บอนที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในระบบที่เหมาะสมต่อไป

### 2.6.5 การเปลี่ยนแปลงภายในชีวมวลในปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน

การทำปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชันอะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส เหลือแต่อะตอมของธาตุคาร์บอนที่ยังเหลืออยู่ อะตอมคาร์บอนที่เหมือนจะเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบไปด้วยวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมูฟังก์ขึ้นขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเป็นผลสืบเนื่องจาก “โครงสร้างทางเคมี” ด้วยความสามารถในการดูดซับเกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่างๆที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงแหวนอะโรมาติก สามารถดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส และกลายเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (Halogen) ออกจากโมเลกุล ฮาโลเจน ทั้งที่อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่างๆบนผิวของตัวอย่าง แต่ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน หรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์

### 2.6.6 การกระตุ้น (Activation) [35,36]

การกระตุ้นคือขั้นตอนการปรับปรุงโครงสร้างของซีวมวลที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (ถ่านชาร์) ในสภาวะปราศจากออกซิเจนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มรูพรุนมากขึ้น ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและการดูดซับที่มากขึ้น การกระตุ้นจะเปลี่ยนจากถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์มีด้วยการ 2 วิธีคือ การกระตุ้นทางกายภาพ และทางเคมี

#### 2.6.6.1 การกระตุ้นทางกายภาพ

วิธีกระตุ้นทางกายภาพเป็นการทำให้พื้นผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ให้มีรูพรุนขนาดต่างๆ ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ไอน้ำ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์อากาศ แก๊สออกซิเจนและแก๊สไอเสียจากโรงงาน ซึ่งเรียกสารดังกล่าวว่า แก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800-1000 °C ขึ้นกับชนิดของวัสดุดิบ แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์ที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมเกิดการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ส่งผลให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างกัันคือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดเล็กใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้คาร์บอนมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัสดุดิบ ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ตัวอย่างการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ คือ

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยการใช้อิน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 2.7



อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะปฏิกิริยาจะกลายเป็น Diffusion controlled rate ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกจำนวนมากจะถูกเผาไหม้ให้มีขนาดและความพรุนของอนุภาคเล็กลง

- การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์โดยการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.8



จากค่า  $\Delta H$  จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทั่วไปมักจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 850-1,100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ด้วย แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเผาไหม้ซึ่งจะให้ทั้งไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอาจมีแก๊สออกซิเจนส่วนเกินบ้างเล็กน้อย หรืออาจจะมีการเติมไอน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้น โดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

- การกระตุ้นด้วยอากาศ โดยการใช้ออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ จัดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 2.9 และ 2.10



การใช้อากาศเพื่อทำการกระตุ้นมีการใช้กันน้อยมาก ทั้งนี้เพราะว่าการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยากกว่า อีกทั้งแก๊สออกซิเจนอาจจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ผิวของถ่านทำให้เกิดความเสียหายได้ด้วย

### 2.6.6.2 การกระตุ้นทางเคมี

วิธีกระตุ้นทางเคมี เป็นการทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันวัสดุที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัสดุและสารเคมีที่ใช้ สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นโดยทั่วไปเป็นสารประเภทอัลคาไลน์ โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอนेट สาร

ประเภทเบส และกรดบางชนิด เช่นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) และ กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นต้น

สารเคมีที่เติมลงไปจะช่วยให้โครงร่างของวัสดุดิบและขณะที่ทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชัน จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัสดุดิบ และเกิดการเชื่อมไขว้กัน (Cross- link) ของโครงร่าง ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงร่างของวัสดุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากติดการเชื่อมไขว้กันนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและการเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมไขว้กัน ประกอบกับสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกตัวอยู่ภายใน ทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำซาร์ที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรด จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก

ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิต่ำไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือมีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัสดุดิบ ชนิดของสารเคมีอัตราส่วนของสารเคมีต่อวัสดุดิบ อุณหภูมิและเวลา ปัจจุบันนิยมใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีมากกว่า เนื่องจากให้ข้อดีดังต่อไปนี้

- (1) อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นต่ำและใช้เวลาน้อย
- (2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ได้รูพรุนขนาดเล็ก และมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน
- (3) ช่วยลดการเกิดทาร์และสารอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการตั้งนั้นร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงค่อนข้างสูง
- (4) องค์ประกอบเก่าของสารตั้งต้น ไม่เป็นอุปสรรคต่อการกระตุ้น

## 2.7 กระบวนการโซลโวเทอร์มัล (Solvothermal)

กระบวนการโซลโวเทอร์มัลเป็นกระบวนการเตรียมสารที่มีความบริสุทธิ์ และมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุลนอกจากนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุต่างๆในการใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ตัวดูดซับ (Adsorbent) แผ่นฟิล์มบาง (Thin Film) สารเคลือบวัสดุ (Coating) และวัสดุชีวภาพ (Biomaterial) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการจะอาศัยหลักการ การให้ความร้อนกับความดันในถังปฏิกรณ์ ในระบบปิดเพื่อที่อยากจะสามารถทำวัสดุที่ต้องการสังเคราะห์ออกมาได้ในกระบวนการจะใช้อุณหภูมิต่ำคือไม่เกิน 300 องศาเซลเซียส โดยมีวิธีการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ทำการเตรียมโซลโดยผสมสารตั้งต้นลงไปผสมกับวัตถุดิบให้อนุภาคของวัตถุดิบที่ใส่ลงไปกระจายตัวออกไปให้ทั่วถึง

2) โซลที่ได้มาจะนำมาใส่ลงไปในถังปฏิกรณ์เพื่อทำการระเหยของออกไปโดยผ่านการให้ความร้อนและความดันที่เหมาะสมทำให้เกิดการสร้างพันธะที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายต่อเนื่องสามมิติคล้ายกับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ เป็นกลไกที่ช่วยทำให้องค์ประกอบทางเคมียึดเกาะไม่ให้แยกออกจากกันเมื่อผ่านกระบวนการสลายตัวของน้ำและเกิดการควบแน่นจะได้วัสดุที่สังเคราะห์ออกมา

-ข้อดีของโซลโวลเทอร์มีลคือ มีขั้นตอนในการสังเคราะห์เพียงขั้นตอนเดียว ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นผลึกสูง และมีรูปร่างที่เหมือนกัน การกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกัน มีความบริสุทธิ์สูง และใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำ

-ข้อเสีย ต้องกำหนดตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ให้เหมาะสมกับวัสดุที่เราเลือกจะสังเคราะห์ด้วย

## 2.8 การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) [37, 38]

เราสามารถจำแนกรูพรุนได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ รูพรุนประเภทแรกคือ “ไมโครพอร์ (Micropore)” เป็นรูพรุนที่มีขนาดความกว้างไม่เกิน 2 นาโนเมตรโครงสร้างรูพรุน แบบไมโครพอร์นี้ถ้ามีอยู่จำนวนมากจะส่งผลให้วัสดุ ดังกล่าวมีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก (หมายถึง พื้นที่ผิวของวัสดุที่โมเลกุลใดๆสามารถเข้าถึงได้ต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุนั้น) และเนื่องจากความกว้างของรูพรุนแบบไมโครพอร์มีขนาดที่โตกว่าขนาดของโมเลกุลทั่วไปไม่มากนักผลที่ตามมาคือ เมื่อมีโมเลกุลใดๆเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในรูพรุนแล้วโมเลกุลเหล่านั้นจะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงอันตรกิริยาจากผนังของรูพรุน เราเรียกแรงอันตรกิริยานี้ว่า “แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interaction)” และแรงแวนเดอร์วาลส์นี้เองที่ทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบ ไมโครพอร์สามารถกักเก็บโมเลกุลบางชนิดเอาไว้ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อนำวัสดุที่มีรูพรุนแบบไมโครพอร์ ไปประยุกต์ในเทคโนโลยีการดูดซับ (Adsorption) หรือ วัสดุสำหรับบำบัดรูปตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีในงานวิจัยด้านวัสดุที่มีรูพรุนในอดีตนักวิจัยมักจะมุ่งเน้นความสำคัญ ไปที่การสังเคราะห์รูพรุนขนาดไมโครพอร์เป็นหลัก เนื่องด้วยต้องการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ เท่านั้นตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) รูพรุนประเภทที่สองซึ่งมีขนาดรูพรุนที่กว้างกว่าคือ มีขนาดความกว้างในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร เรียกว่า “มีโซพอร์ (Mesopore)” โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูพรุน แบบมีโซพอร์ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ขนาดความกว้างอยู่ระหว่าง 2 ถึง 10 นาโนเมตร) จะมีประโยชน์คล้ายกับรูพรุน แบบไมโครพอร์ในด้านความสามารถในการกักเก็บโมเลกุลโดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลขนาดใหญ่จำพวกสารชีวโมเลกุล เช่น เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ เป็นต้นเนื่องจาก สารชีวโมเลกุลโดยมากมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ในระดับนาโนเมตร จึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์จากผนังของมีโซพอร์ยังคงมีอิทธิพลต่อโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้ ผลที่ตามมาทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบมีโซพอร์ขนาดเล็กยังคงมีศักยภาพในการกักเก็บสารชีวโมเลกุลเหล่านี้ได้เป็นอย่างดีด้วยลักษณะดังกล่าวจึงทำให้โครงสร้าง รูพรุนแบบมีโซพอร์นั้นมักถูกนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการตรึงรูปร่างเอนไซม์ [39, 40] สำหรับรูพรุนแบบมีโซพอร์ขนาดใหญ่ (ขนาดความกว้างตั้งแต่ 10 นาโนเมตร) ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินาเจล (Alumina gels) อะมิโนซิลิเกตคตะลิสต์ (Aminosilicate catalyst) รูพรุนประเภทที่สามคือ “แมคโครพอร์ (Macropore)” หมายถึง รูพรุนที่มีขนาดความกว้างตั้งแต่ 50 นาโนเมตร ขึ้นไป เดิมทีในอดีตนั้นโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่เหล่านี้ (ทั้งมีโซพอร์ขนาดใหญ่และแมคโครพอร์) ไม่ได้ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากไม่ได้มีส่วนช่วยโดยตรงต่อการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุรูพรุน รวมถึงการมีขนาดความกว้างของรูพรุนที่ใหญ่กว่าโมเลกุลทั่วไปมาก (หลายร้อยเท่า) จึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ไม่มีอิทธิพลภายในรูพรุนเหล่านี้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนักวิจัยด้านวัสดุที่มีรูพรุนได้มุ่งความสำคัญไปยังการมีอยู่ของโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่เหล่านี้ในวัสดุ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนดังกล่าวมีประโยชน์เป็นอย่างมากในด้านการเป็นช่องทางลำเลียงขนาดใหญ่สำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่างๆ ไปยังรูพรุนแบบไมโครพอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากช่วยลดความต้านทานที่เกิดจากการ แพร่ผ่านรูพรุนของโมเลกุลของของไหลที่เคลื่อนที่เข้ามาได้ [41-43]

## 2.9 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

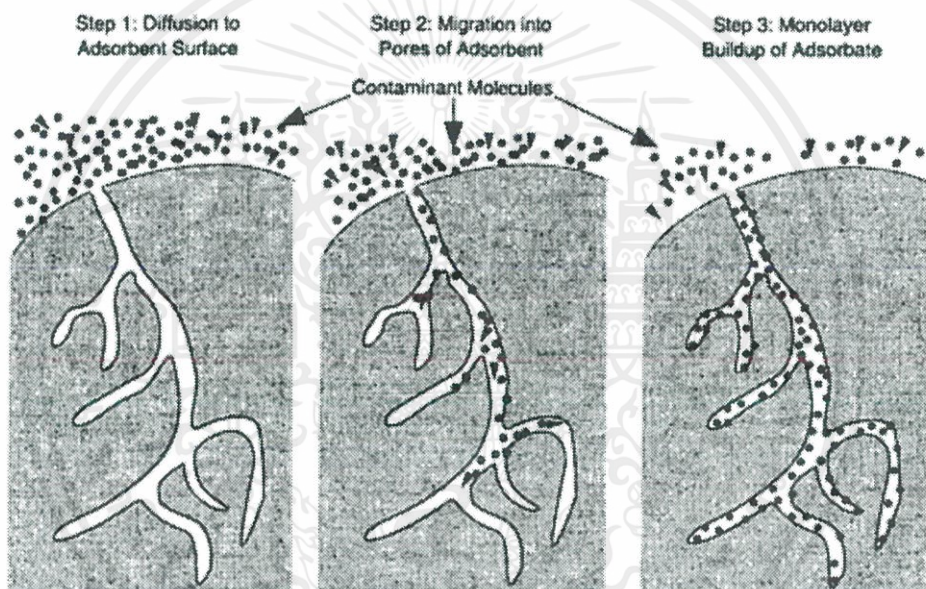
การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่นของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

### 2.9.1. กลไกของกระบวนการดูดซับการดูดซับ (Adsorption)

เป็นกระบวนการที่พวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว- ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid-Solid Interface) ในการดูดติดผิว โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุด สมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี



[http://www.pcd.go.th/info\\_serv/Datasmell/design\\_absorbtion.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.html)

รูปที่ 2.7 กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์

### 2.9.2. ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.2.1. การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุล สารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

### 2.9.2.2. การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับ กับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

ตารางที่ 2.4 แสดงความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อเมตร	20 กิโลจูลต่อเมตร
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊สของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	monolayer และ multilayer	monolayer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.3. ไอโซเทอมการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วยโดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลาย ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม (Isotherm)” ดังแสดงในรูป 1.8 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปีค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

**Type I** เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโอไลต์พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

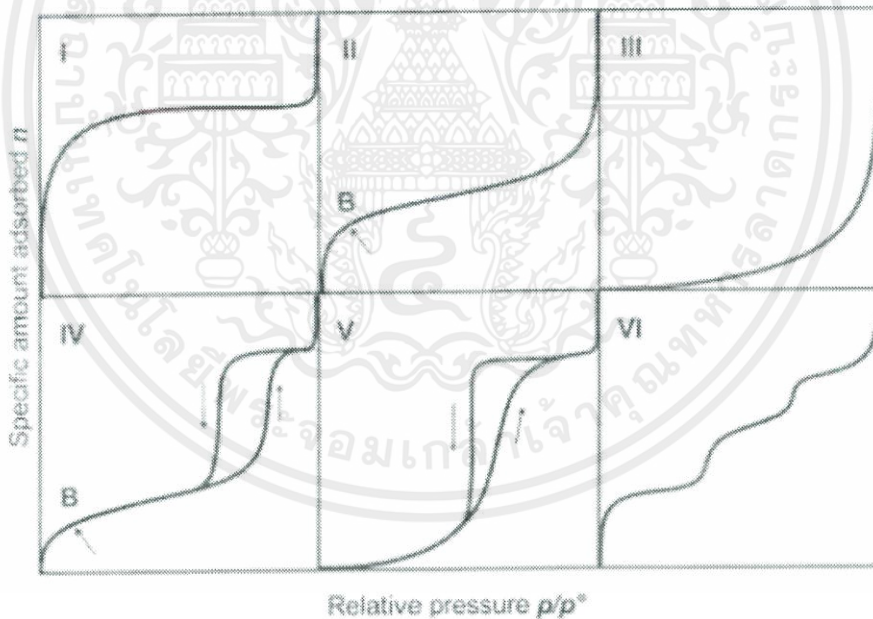
**Type II** ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้นดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

**Type III** เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกแก้ว ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบบ่อยมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารีนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน(Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มีHysteresis loop) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบบ่อยน้อย

Type VI เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบบ่อยน้อย โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



<http://www.bel-europe.com/tech/bel/seminar02.html>

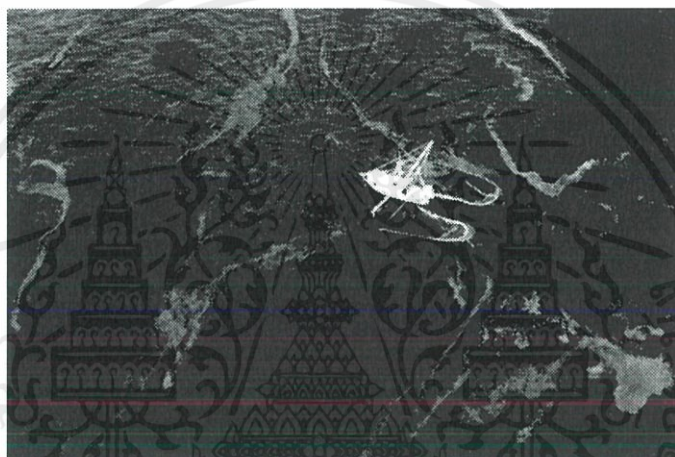
รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดซับ [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 ปัญหาน้ำมันรั่วในทะเล [45-47]

น้ำมันรั่วไหล (Oil Spill) การรั่วไหลของน้ำมันสามารถเกิดได้ทั้งตามธรรมชาติ เช่น รั่วจากแหล่งน้ำมันใต้ดิน หรือจากการกระทำของมนุษย์ เช่น อุบัติเหตุจากเรือ การขุดเจาะน้ำมัน หรือการลักลอบปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำ การรั่วไหลส่วนมากมักมีที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์

สาเหตุหนึ่งของน้ำมันรั่วไหลในทะเลมาจากกิจกรรมการขนส่งทางทะเล การพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศจะควบคู่ไปกับการความต้องการพลังงานภายในประเทศที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเพิ่มขึ้น และอาจเกิดอุบัติเหตุทำให้น้ำมันบางส่วนเกิดรั่วไหลลงสู่ทะเลเสมอ ถึงแม้จะมีมาตรการป้องกันต่างๆแล้วก็ตาม



<http://www.unigang.com/Article/15193>

รูป 2.9 น้ำมันรั่วไหลในทะเล

### 2.10.1 ตัวอย่างเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลครั้งใหญ่ที่สุดในโลก

1. ระหว่างสงครามอ่าวเปอร์เซียครั้งแรก เมื่อปี 2534 เกิดเหตุน้ำมันดิบของคูเวตมากถึง 240-336 ล้านแกลลอน รั่วไหลไหลลงสู่อ่าวเปอร์เซียครอบคลุมพื้นที่ใหญ่กว่าเกาะฮาวายเสียอีก ไม่นับรวมน้ำมันในบ่อน้ำมันที่ถูกเผาไปอีกราว 1-1.5 พันล้านบาร์เรล สาเหตุมาจากทหารอิรักที่ยาตราทัพบุกยึดคูเวตได้เปิดวาล์วบ่อน้ำมัน 600 บ่อ และท่อส่งน้ำมันระหว่างถอนทหารออกจากคูเวตเพื่อขัดขวางทหารอเมริกันไม่ให้ตีโต้เร็วเกินไปนัก กว่าจะดับไฟที่ลุกโชนเหนือบ่อน้ำมันได้ต้องใช้เวลานานถึง 10 เดือน

ในส่วนของการทำความสะอาดคราบน้ำมันนั้น กองกำลังพันธมิตรนำโดยสหรัฐฯ ได้ใช้ระเบิดสมาร์ทบอม์หยุดยั้งการรั่วไหลของน้ำมันจากท่อส่งน้ำมัน แต่การฟื้นฟูต้องชะลอออกไปช่วงขณะจนกระทั่งสงครามยุติลงแล้ว ระหว่างนั้นได้วางทุ่นกักน้ำมัน (boom) เพื่อดักจับคราบน้ำมันซึ่งเกิดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกโชนกลางอ่าวเปอร์เซียเป็นวงกว้างขนาด 25 ไมล์ รวมทั้งใช้อุปกรณ์สกินเมอร์ (skimmer) 21 ตัว เพื่อนำคราบน้ำมันไปเก็บในภาชนะที่เตรียมไว้บนเรือ และยังใช้รถบรรทุกดูดคราบน้ำมันไปทิ้งด้วย ทั้งหมดนี้สามารถกำจัดคราบน้ำมันได้ราว 58.8 ล้านแกลลอน

จากรายงานของยูเนสโกระบุว่า เหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลที่อ่าวเปอร์เซียในครั้งนั้น ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและการประมงท้องถิ่นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รายงานนี้สรุปด้วยว่าราวครึ่งหนึ่งของคราบน้ำมันได้ระเหยกลายเป็นไอ อีกราวหนึ่งในแปดได้รับการชำระล้าง อีกหนึ่งในสี่ซัดเข้าชายฝั่งของซาอุดีอาระเบีย

2. แทนชุดเจาะน้ำมัน “ดีพวอเตอร์ ฮอไรซอน” กลางอ่าวเม็กซิโก นอกชายฝั่งสหรัฐฯ ของบริษัท “บริติช ปิโตรเลียม” หรือ “บีพี” บริษัทผลิตน้ำมันรายใหญ่ที่สุดของอังกฤษ ได้เกิดระเบิดเมื่อวันที่ 20 เม.ย. 2553 ขณะคนงานกำลังขุดเจาะน้ำมันที่ระดับความลึก 1,500 เมตร เป็นเหตุให้คนงานเสียชีวิตทันที 11 ราย บาดเจ็บ 17 ราย ขณะเดียวกัน ทำให้น้ำมันดิบรั่วไหลลงสู่อ่าวเม็กซิโกมาก ถึง 4.9 ล้านบาร์เรล กว่าจะสามารถอุดต่อชุดเจาะที่รั่วออกมาได้ ถือเป็นหนึ่งในเหตุการณ์การรั่วไหลของน้ำมันดิบครั้งเลวร้ายที่สุดในประวัติศาสตร์โลก ชายฝั่งของสหรัฐฯ ปนเปื้อนด้วยคราบน้ำมันดิบเป็นแนวยาว 1,728 กม. สร้างความเสียหายให้กับระบบนิเวศและอุตสาหกรรมประมงอย่างประเมินค่าไม่ได้ ทั้งปะการังและสัตว์ทะเลอย่างเต่าและนกหายากตายไปอย่างน้อย 8,000 ตัว และจนถึงขณะนี้บริเวณแนวชายฝั่งรัฐเท็กซัส ลุยเซียนา มิสซิสซิปปี อลาบามา และฟลอริดา ยังคงต้องเผชิญกับปัญหาคราบน้ำมันตกค้างมาอยู่

บริษัทบีพีอ้างว่าได้ใช้เวลานาน 87 วัน ทำความสะอาดคราบน้ำมันทั้งหมดรวมทั้งกู้แทนชุดเจาะที่จมใต้ทะเลด้วย โดยการทำความสะอาดคราบน้ำมันนั้น สิ่งแรกที่บริษัทบีพีเร่งดำเนินการก็คือ การปิดรอยรั่วของบ่อน้ำมัน ซึ่งต้องใช้เวลาหลายเดือนกว่าจะแล้วเสร็จ ระหว่างนั้น ก็มีการโปรยสารกระจาย (dispersant) อันเป็นสารเร่งจำกัดการแพร่กระจายของคราบน้ำมัน และกำจัดคราบน้ำมันบนผิวน้ำด้วยวิธีการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการใช้เรือดูดคราบน้ำมัน การใช้หุ่นลอยความยาวกว่า 5 ล้าน 5 แสนฟุตเพื่อดักจับและซับคราบน้ำมัน การใช้สารเคมีดูดซับน้ำมันโปรยลงผิวน้ำ หรือแม้แต่การเผาเพื่อกำจัดน้ำมัน ซึ่งยิ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นอย่างไรก็ตาม ผลการขุดกู้ของสื่อตะวันตกพบว่า ทั้งหมดนี้เป็นแค่ราคาคุยของบริษัทบีพี เพราะจนถึงขณะนี้ การกำจัดคราบน้ำมันดิบยังไม่แล้วเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. น้ำมันดิบทะเลลึกจากบ่อน้ำมันอิซทอก-1 อ่าวกัมพาเซ ประเทศเม็กซิโก เมื่อปี 2522 สาเหตุมาจากแท่นขุดเจาะเซดโค 135 เอฟ ของบริษัทน้ำมันเปเม็กซ์ของเม็กซิโกเกิดระเบิด ระหว่างขุดเจาะน้ำมันที่ความลึกใต้ทะเล 3600 เมตร ทำให้มีน้ำมันดิบรั่วไหลออกมาราววันละ 10,000-30,000 บาร์เรล และตลอดช่วง 10 เดือนหลังจากนั้น มีน้ำมันดิบราว 140 ล้านแกลลอน รั่วไหลไปยังอ่าวเม็กซิโก ทำให้พื้นที่ชายฝั่งจากรัฐเท็กซัสไปจนถึงในเม็กซิโกปนเปื้อนน้ำมันดิบเป็นคราบยาวถึง 261 กม.

สำหรับการทำความสะอาดคราบน้ำมัน เพื่อจะชะลอการรั่วไหลของน้ำมันดิบจากบ่อน้ำมันที่ได้รับผลกระทบ ตอนแรกมีการใช้โคลน แท่งเหล็กกล้า ลูกบอลเหล็ก และตะกั่ว หย่อนลงไปใบบ่อน้ำมัน จากรายงานของเปเม็กซ์หรือการปิโตรเลียมเม็กซิโกเปิดเผยว่า ราวครึ่งหนึ่งของน้ำมันได้เกิดลูกใหม่ขณะทะเลลึกขึ้นมาสู่ผิวน้ำ อีกหนึ่งในสามระเหยกลายเป็นไอ เปเม็กซ์ยังได้ว่าจ้างบริษัทหนึ่งให้โปรยและฉีดพ่นสารกระจาย ซึ่งเป็นสารเพิ่มการกระจายตัวของน้ำมัน อันจะช่วยให้จัดการน้ำมันดิบได้ง่ายขึ้น ด้วยวิธีนี้ทำให้ช่วยลดผลกระทบจากคราบน้ำมันที่ไหลเข้าฝั่ง

นอกจากนี้ยังได้วางตุนักน้ำมัน เพื่อดักจับคราบน้ำมัน และอุปกรณ์สกิมเมอร์ เพื่อเก็บคราบน้ำมัน จะได้ปกป้องอ่าวและลากูนของเกาะปะการังที่อยู่รอบๆ กระนั้น ระบบนิเวศและสัตว์ทะเลก็ได้รับผลกระทบไม่ใช่น้อย ปริมาณของปลาและปะการังมีกลดลงไปถึง 50-70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปูในพื้นที่เกือบจะสูญพันธุ์จากมหาพิบัติภัยครั้งนี้

### 2.10.2 ผลกระทบจากน้ำมันรั่วไหล

น้ำมันที่รั่วไหลสู่แหล่งน้ำจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพ ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เริ่มจากน้ำมันบางส่วนระเหยไป น้ำมันที่เหลือจะเปลี่ยนสภาพไปตามคุณสมบัติเฉพาะของชนิดน้ำมันนั้นๆ และปัจจัยต่างๆ เช่น แสงแดด กระแสน้ำ อุณหภูมิ ฯลฯ

คราบน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลง และปิดกั้นการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช สาหร่าย และพืชน้ำต่างๆ เปลี่ยนแปลงสภาวะการย่อยสลายของแบคทีเรียในน้ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดล้วนส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำที่อาศัยอยู่บริเวณนั้น (ปลา สัตว์หน้าดิน ปะการัง ฯลฯ) รวมถึงนกน้ำด้วย เกิดการสะสมสารพิษในห่วงโซ่อาหารที่เริ่มตั้งแต่ผู้ผลิต (แพลงก์ตอนพืช) ผู้บริโภคขั้นต้น (แพลงก์ตอนสัตว์/ปลา) จนถึงผู้บริโภคขั้นสุดท้าย ซึ่งก็คือมนุษย์

คราบน้ำมันยังส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมท่องเที่ยว ประมงและการเพาะเลี้ยงชายฝั่ง เช่น สัตว์น้ำตายจากคราบน้ำมัน ขาดออกซิเจน ชายหาดสกปรกจากคราบน้ำมัน ทำลายทัศนียภาพ มีกลิ่นเหม็น ไม่เหมาะกับการท่องเที่ยวและพักผ่อน ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจในชุมชนท้องถิ่นและระดับประเทศ

ความรุนแรงของผลกระทบจากน้ำมันรั่วไหล ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้งชนิดของน้ำมัน ปริมาณที่รั่วไหล สภาพภูมิศาสตร์ของบริเวณที่เกิดรั่วไหล กระแสน้ำ กระแสลม การขึ้น-ลงของน้ำทะเล ตลอดจนความหลากหลายและความสมบูรณ์ของทรัพยากรรอบๆบริเวณนั้นการเกิดน้ำมันรั่วไหลในทะเลไทย

กรมควบคุมมลพิษ รายงานว่าในระหว่างปี พ.ศ. 2519 – 2553 เกิดเหตุน้ำมันรั่วไหลที่ได้ดำเนินการตรวจสอบและจัดการแก้ไขร่วมกับหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้อง 124 เหตุการณ์ ส่วนใหญ่เป็นการรั่วไหลในปริมาณเล็กน้อย สาเหตุของการรั่วไหลที่พบบมากที่สุดคือ

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเดินเรือ เกือบกัก หรือสูบลอยน้ำมันชำรุด
2. รั่วไหลระหว่างการสูบลอยน้ำมันกลางทะเลจากเรือขนาดใหญ่ลงสู่เรือขนาดเล็ก หรือระหว่างเรือกับท่าเทียบเรือ
3. การลักลอบทิ้ง เช่น ปล่อยทิ้งน้ำมันชนิดเดิมก่อนบรรทุกน้ำมันชนิดใหม่ หรือลักลอบถ่ายน้ำอับเฉา
4. เรืออับปาง เนื่องจากเรือโดนกัน ชนหินโสโครก/หินฉลาม หรือไฟไหม้
5. สาเหตุอื่นๆ เช่น รั่วไหลจากแท่นขุดเจาะปิโตรเลียมในทะเล น้ำทิ้งจากฝั่ง หรือรั่วไหลตามธรรมชาติ

### การจำแนกปริมาณน้ำมันรั่วไหลเป็น 3 ระดับ (Tier)

**ระดับที่ 1 (Tier I)** ปริมาณรั่วไหลไม่เกิน 20 ตันลิตร ส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างขนถ่ายน้ำมัน ผู้ที่ทำให้เกิดน้ำมันรั่วไหลต้องเป็นผู้รับผิดชอบในการขจัดคราบน้ำมัน และ/หรือได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยต้องแจ้งให้กรมเจ้าท่าทราบก่อน

**ระดับที่ 2 (Tier II)** รั่วไหลมากกว่า 20 - 1,000 ตันลิตร อาจเกิดจากเรือโดนกัน การขจัดคราบน้ำมันต้องร่วมมือกันระหว่างภาคเอกชนและภาครัฐ ตามแผนป้องกันและขจัดมลพิษทางน้ำ เนื่องจากน้ำมันแห่งชาติ และต้องแจ้งให้กรมเจ้าท่าทราบก่อน หากเกินขีดความสามารถของทรัพยากรที่มี อาจต้องขอรับการสนับสนุนจากต่างประเทศ

ระดับที่ 3 (Tier III) ปริมาณรั่วไหลมากกว่า 1,000 ตันลิตร อาจเกิดจากอุบัติเหตุที่รุนแรง การจัดการน้ำมันในระดับนี้ต้องการความร่วมมือจากหน่วยงานต่างๆในประเทศ และต้องอาศัยความช่วยเหลือระดับนานาชาติ

จากสถิติกรมเจ้าท่า ระหว่างปี พ.ศ. 2540 – 2553 พบการรั่วไหลของน้ำมันในปริมาณมาก (20,000 ลิตรขึ้นไป) ทั้งหมด 9 ครั้ง พบเกิดในทะเลและชายฝั่งท่าเทียบเรือ ส่วนมากพบการรั่วไหลบริเวณท่าเทียบเรือจากอุบัติเหตุระหว่างการขนถ่ายน้ำมัน และจากอุบัติเหตุต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 สถิติเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลปริมาณมาก ระหว่างปี พ.ศ. 2540 – 2553

รายงานน้ำมันรั่วไหล ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ตั้งแต่ พ.ศ. 2547 จน พ.ศ. 2555 (กรมเจ้าท่า, 2559) และช่วงที่ 2 ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนปี พ.ศ. 2557 จนถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2559 (สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเล ชายฝั่งทะเล และป่าชายเลน, 2559) แสดงดัง ตารางที่ 2 โดยพบว่าในฝั่งอ่าวไทยมีจำนวนครั้งของการเกิดน้ำมันรั่วไหลลงสู่ทะเลและชายฝั่งมากกว่า อันดามัน และมีรายงานมากที่สุดในเขต 1 อ่าวไทยฝั่งตะวันออก

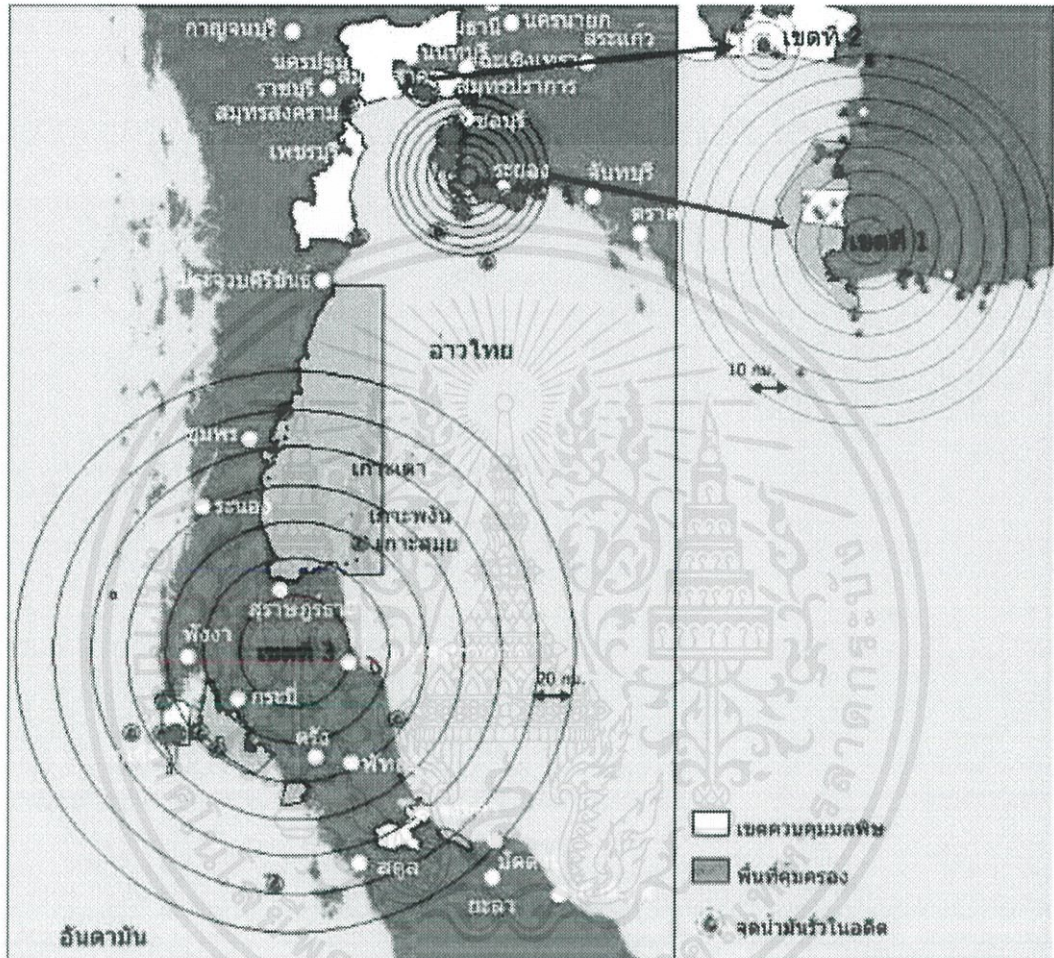
ตารางที่ 2.5 ความถี่ในการเกิดน้ำมันรั่วไหลที่พบตามแนวชายฝั่งและทะเลในประเทศไทย

บริเวณชายฝั่งที่พบ น้ำทะเลเปลี่ยนสี	ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2556*		พ.ย. 2557 ถึง ก.ย. 2559**	
	ครั้ง	ร้อยละ	ครั้ง	ร้อยละ
เขต 1 อ่าวไทยฝั่งตะวันออก	27	43	7	55
เขต 2 อ่าวไทยตอนบน	10	16	2	15
เขต 3 อ่าวไทยตอนกลาง	2	3	2	15
เขต 4 อ่าวไทยตอนล่าง	4	6	2	15
บริเวณแท่นผลิต / แท่นขุดสำรวจปิโตรเลียม ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในเขตเศรษฐกิจจำเพาะ	15	24		
รวม อ่าวไทย	43	92	13	100
เขต 5 อันดามันตอนบน	3	5		
เขต 6 อันดามันตอนล่าง	2	3		
รวม อันดามัน	5	8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เขตความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหลในน่านน้ำไทย

ส่วนแหล่งน้ำทะเล สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ ได้จำแนกเขตความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหล ในน่านน้ำทะเลไทย ตามระดับความเสี่ยงและความรุนแรงต่อการได้รับผลกระทบจากน้ำมันรั่วไหล ออกเป็น 4 เขต ดังนี้



[http://www.mkh.in.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=277&Itemid=235&lang=th](http://www.mkh.in.th/index.php?option=com_content&view=article&id=277&Itemid=235&lang=th)

รูปที่ 2.10 เขตความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหลในน่านน้ำไทย

### เขตที่ 1 มีความเสี่ยงสูงมาก

ได้แก่ บริเวณชายฝั่งทะเลด้านตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา ชลบุรี และระยอง เป็นที่ตั้งของนิคมอุตสาหกรรม มีกิจกรรมการขนถ่ายน้ำมันบริเวณท่าเทียบเรือและกลางทะเล มีการจราจรทางน้ำหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เขตที่ 2 มีความเสี่ยงสูง

ได้แก่ บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาถึงท่าเรือคลองเตย เป็นเส้นทางหลักของเรือบรรทุกน้ำมัน เรือสินค้า และเรือโดยสาร อีกทั้งเป็นที่ตั้งคลังน้ำมันหลายแห่งริมฝั่งแม่น้ำ

## เขตที่ 3 มีความเสี่ยงสูงปานกลาง

ฝั่งทะเลอ่าวไทย ได้แก่ อ่าวไทยด้านตะวันตก ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช กระบี่ พัทลุง และสงขลา และฝั่งทะเลอันดามัน ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดระนอง พังงา กระบี่ ตรัง และสตูล น้ำมันรั่วไหลอาจเกิดจากเรือบรรทุกน้ำมันที่เดินทางเข้าออกช่องแคบมะละกา การขนถ่ายน้ำมัน ท่าเรือน้ำลึก และท่าเรือโดยสาร ฯลฯ

## เขตที่ 4 มีความเสี่ยงต่ำ

ได้แก่ พื้นที่บริเวณฝั่งอ่าวไทยและทะเลอันดามันนอกเหนือจากที่ระบุไว้ใน 3 เขตข้างต้น

### 2.10.3 กระบวนการในการกำจัดน้ำมัน

การจัดการกับน้ำมันดิบที่รั่วไหลสู่ท้องทะเล มีวิธีการให้เลือกใช้ได้มากมายหลายแบบตามแต่ ปัจจัยแวดล้อมของพื้นที่ และปริมาณมากน้อยของน้ำมันดิบที่รั่วไหล โดยวิธีการดังกล่าวสามารถแบ่ง ออกเป็น 3 วิธีดังนี้

#### 2.10.3.1 วิธีการทางกายภาพ

- 1). การใช้ทุ่นกั้นน้ำมัน เป็นวิธีที่มาตรฐานที่สุด ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ น้ำมันแพร่กระจายไป เป็นวงกว้าง ก่อนจะใช้เรือกวาดน้ำมัน (หรือดูดน้ำมัน) จัดการขั้นต่อไป วิธีนี้ขึ้นกับสภาพ อากาศและน้ำทะเลเป็นอย่างมาก รวมทั้งยังขึ้นกับลักษณะของน้ำมันดิบที่รั่วไหลด้วยที่ อาจส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของเรือได้ด้วย
- 2). การเผาทำลายเพื่อลดปริมาณน้ำมันดิบ ในกรณีที่น้ำมันรั่วไหลเป็นปริมาณมาก และอาจไหลเข้าชายฝั่งหรือชายหาด อาจจำกัดบริเวณการแพร่กระจายด้วยทุ่นก่อน แล้วจึง เผาทำลาย วิธีนี้ต้องใช้แต่เนิ่นๆ ทันทีที่ทราบว่ามีน้ำมันดิบรั่วไหลเท่านั้น แต่ก็มีจุดอ่อนคือทำให้ เกิดของเสียในอากาศเป็นปริมาณมากแทน
- 3). การใช้เครื่องจักรหรือใช้แรงงาน เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดโดยเป็นการทำ ความสะอาดตรงที่เกิดเหตุ แม้จะเป็นวิธีที่กินเวลามาก แต่นิยมใช้เพราะสามารถใช้แรงงานที่ ไม่ต้องผ่านการฝึกฝนมากนัก แต่ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันตัวอย่างเหมาะสม เครื่องมือหนักอาจ ทำลายพื้นผิวหน้าบริเวณนั้นมากเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.3.2 วิธีการทางเคมี

1). การใช้วัสดุดูดซับน้ำมัน วิธีนี้มักใช้กับพื้นที่ซึ่งน้ำมันรั่วไหลไม่มากนัก หรือไม่ก็ใช้ในขั้นตอนสุดท้ายที่เหลือน้ำมันไม่มากแล้ว วัสดุที่ใช้มีแตกต่างกันไป สารอินทรีย์เช่น ฟาง หญ้าแห้ง ขี้เลื่อย ขนนก ดูดซับได้ราว 3-15 เท่าของน้ำหนัก และมักจมตัวลงทำให้เก็บยาก สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียว หรือเถ้าภูเขาไฟ ดูดซับได้ราว 4-20 เท่าของน้ำหนัก แต่มีปัญหาแบบเดียวกับสารอินทรีย์ และมักใช้กับน้ำมันที่ลอยอยู่ผิวหน้าไม่ได้ สารสังเคราะห์มีสมบัติคล้ายพลาสติก กลุ่มนี้ดูดซับได้ถึง 70 เท่าของน้ำหนัก แต่มีปัญหาคือภายหลังดูดซับน้ำมันแล้ว ต้องเคลื่อนย้ายวัสดุพวกนี้ไปทำลายต่อ

2). การใช้เจล สารบางชนิดที่มีลักษณะเป็นเจลจะไปช่วยทำให้น้ำมันดิบที่รั่วแข็งตัวจนมีลักษณะคล้ายก้อนยางแล้วจึงใช้ตาข่าย เครื่องดูดหรือเครื่องกวาดเก็บมากำจัดต่อไป ปัญหาใหญ่ของวิธีการนี้คือต้องใช้เจลเป็นจำนวนมากคือ ราว 3 เท่าของน้ำมัน ดังนั้น จึงอาจจะยากที่จะนำไปใช้จริง

3). การใช้สารลดแรงตึงผิว หรือ สารกระจายแรงตึงผิว (surface dispersant) โดยการฉีดพ่นโดยเครื่องบิน เรือ หรือคนงานที่ชายหาด วิธีนี้ก็ใช่อีกวิธีหนึ่งที่นิยม อนุภาคน้ำมันดิบจะกระจายตัวออก ไม่เกาะเป็นก้อน ไม่ตกเป็นตะกอน เป็นพิษน้อยลง ก่อนจะถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่กินคราบน้ำมันต่อไป ข้อดีของวิธีนี้คือใช้ได้ในวงกว้าง แต่ข้อเสียคือสารพวกนี้เองบางชนิดก็เป็นพิษเช่นกัน

4). การใช้เครื่องปั๊มแยกน้ำมัน สำหรับน้ำมันปนเปื้อนที่ต้องจัดการต่อไปนั้น มีเทคโนโลยีและอุปกรณ์หลายรูปแบบที่ใช้แยกน้ำมันออกได้ การใช้เครื่องปั๊มแยกน้ำมันก็เป็นวิธีหนึ่ง โดยอาศัยสมบัติของน้ำมันที่มีความหนาแน่นน้อย (เบา) กว่าน้ำเป็นตัวช่วยในการแยก

### 2.10.3.3. วิธีการทางชีวภาพ

1). การใช้จุลินทรีย์ จุลินทรีย์บางชนิดสามารถย่อยสลายน้ำมันดิบได้ วิธีใช้คือการโปรยหรือฉีดจุลินทรีย์ดังกล่าวลงไปในบริเวณที่มีน้ำมันรั่ว และอาจต้องใช้ตัวช่วยอื่นๆ ด้วย เช่น ปุ๋ย ผลสุดท้ายที่ได้คือ คราบน้ำมันมีขนาดโมเลกุลเล็กลงและไม่เป็นพิษ แต่วิธีนี้จะกินเวลามากกว่าวิธีอื่นๆ

2). การใช้ซีฟี่ง ดร.โจเซฟ เรสเนค เคยเสนอให้ใช้ PRP/WAPED (Petroleum Remediation Product and Water Pollution Eradication Device) ประกอบด้วยซีฟี่ง

ทรงกลมจิว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25-0.65 ไมครอน ซึ่งภายในบรรจุแบคทีเรียชนิดซูโดโมแนด (Pseudomonad) เอาไว้แบคทีเรียดังกล่าวย่อยน้ำมันดิบได้เขาเสนอให้ใช้วิธีนี้สำหรับการทำความสะอาดในบริเวณน้ำลิก

3). การใช้เห็ด งานวิจัยของ ดร.พอล สเตเม็ทส์ ชี้ว่าเห็ดบางชนิดสามารถใช้ทำความสะอาดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันดิบได้ดี เพราะเห็ดจะหลั่งกรดและเอนไซม์หลายชนิดออกมาย่อยน้ำมันดิบที่ปนเปื้อนจนได้สารประกอบที่ไม่เป็นพิษในที่สุดการเลือกวิธีการแก้ไขปัญหาน้ำมันดิบจึงมีปัจจัยและมีทางเลือกต่างๆอยู่ไม่น้อย

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [48-50]

Dilek Angin ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่อเมล็ดดอกคำฝอยด้วยวิธีการไพโรไลซิส งานวิจัยนี้พูดถึง Biomass จากเมล็ดดอกคำฝอย สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้หลายวิธีแต่การวิจัยนี้จะวิธีไพโรไลซิสเพราะเป็นวิธีที่ให้พลังงานของ biochar สูงและเกิดมลพิษน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆนอกจากนี้การไพโรไลซิสยังได้ผลผลิตออกมาทั้งก๊าซชีวภาพ น้ำมัน และถ่าน แต่งานนี้จะตรวจคุณสมบัติของชีวมวลลักษณะทางสัณฐานวิทยาต่างๆของเมล็ดดอกคำฝอยที่อุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างมาตรวจสอบเพราะดอกคำฝอยถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแต่ยังไม่ได้วิเคราะห์คุณสมบัติ biochar ของเมล็ดดอกคำฝอยจึงมีงานวิจัยนี้ขึ้นมา สรุปได้ว่าการศึกษาด้วยการไพโรไลซิสพบว่าสามารถทำได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าและมีประโยชน์มากขึ้น biochar จากเมล็ดดอกคำฝอย (SPC) ซึ่งปัจจุบันใช้เป็นอาหารสัตว์เท่านั้น ชีวเคมีของ SPC สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ชีวเคมีที่ได้จากอุณหภูมิไพโรไลซิสสูง (600 องศาเซลเซียส) เหมาะสำหรับการใช้งานโดยตรงในการใช้เชื้อเพลิงเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูงคงที่สูงค่าความร้อนสูงและมีการระเหยต่ำ ชีวเคมีสามารถใช้เป็นวัตถุดิบทางเคมีเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมได้

สืบศิริ แซ่ลี และศักดิ์ชาย ลิกษา (2555) ทำการวิจัยและศึกษากระบวนการผลิตและสมบัติของแผ่นผ้าและผนังฉนวนกันความร้อนจากพืชในเขตพื้นที่ประเทศไทย พบว่า หญ้าคา ฐูปญาชีและกระถินยักษ์มีความเหนียวอยู่ในตัว มีความเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ทำสี ทำกลิน และนำไปผลิตเป็นของตกแต่งบ้าน ด้วยวิธีการถักทอ การอัดเป็นแผ่นป็นและการหล่อขึ้นรูป ส่วนด้านการพัฒนาแผ่นผ้าและฉนวนกันความร้อน พบว่าตัวประสานที่เหมาะสม คือ กาวลาเท็กซ์ น้ำยางพารา ยูรีเทนถือเป็นวัสดุประสานที่มีความโปร่งใส มีน้ำหนักเบา น้ำหนักกันแมลง ส่วนกรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสมควรใช้การอัดเป็นแผ่น และการหล่อขึ้นรูป สำหรับแผ่นผ้าและฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยพืชที่ได้จากการทดลอง จัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ตีประเภทหนึ่ง โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของวัสดุต้านแรงดึงสูงสุด พบว่า วัสดุ Sample 1 (A) มีค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงสูงสุด 0.84 MPa และมีค่าเฉลี่ยการยืดตัว ณ จุดขาดร้อยละ 3.36 Sample 2 (B) มีค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงสูงสุด 100 MPa และมีค่าเฉลี่ยการยืดตัว ณ จุดขาดร้อยละ 5.22 Sample 3 (C) มีค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงสูงสุด 1.06 MPa และมีค่าเฉลี่ยการยืดตัว ณ จุดขาดร้อยละ 6.50 และการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของวัสดุสภาพนำความร้อน พบว่า วัสดุมีค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในช่วง 23.56 W/m.K และมีค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน ณ อุณหภูมิร้อยละ 0.043 หลังจากนั้น ผู้วิจัยได้แบ่งการพัฒนาผลิตภัณฑ์ออกเป็น 2 แบบ คือ แผ่นผ้า และฉนวนกันความร้อน โดยนำวัสดุแผ่นเส้นใยพืช+ตัวประสานในสัดส่วน 70: 30 และยังได้นำวัสดุที่ได้จากการทดลองมาทดลองผลิตเป็นของใช้และของตกแต่งบ้านเพิ่มเติม ทั้งนี้ ผู้วิจัยจากการประเมินความคิดเห็นของกลุ่มผู้ผลิต จำหน่ายผลิตภัณฑ์ และผู้บริโภคในภาพรวม พบว่าเห็นด้วยในระดับมากที่สุด จากการวิจัยและศึกษาพบว่า หญ้าคา ฐูปะธานีและกระถินยักษ์ มีความเหนียวอยู่ในตัวมีความเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ทำสี ทำกลั่น และนำไปผลิตเป็นของตกแต่งบ้าน ด้วยวิธีการถักทอ การอัดเป็นแผ่น ส่วนด้านการพัฒนาแผ่นผ้าและฉนวนกันความร้อน พบว่า ตัวประสานที่เหมาะสม คือ กาวลาเท็กซ์ น้ำยางพารายูรีเทนถือเป็นวัสดุประสานที่มีความโปร่งใส มีน้ำหนักเบา กันน้ำ กันแมลง ส่วนกรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสมควรใช้การอัดเป็นแผ่น และการหล่อรูปขึ้น

จิต หนูแก้ว (2556) ทำการศึกษาเรื่องโครงสร้างของดอกต้นฐูปะธานี พบว่า สาเหตุที่พืชชนิดนี้สามารถซับน้ำมันได้ดี เนื่องจากโครงสร้างชีวภาพมีส่วนประกอบจากคาร์บอน เช่นเดียวกับน้ำมัน จึงมีคุณสมบัติที่จับตัวเข้าด้วยกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการค้นพบที่คาดไม่ถึงจากการทดลองคุณสมบัติการดูดซับน้ำมันจากวัสดุธรรมชาติหลายชนิด เช่น ฟางข้าว กาบมะพร้าว แต่พบว่า ดอกฐูปะธานีซับน้ำมันได้ดีกว่าวัสดุอื่นๆ หลายเท่า หากเทียบกับน้ำหนักของตัวมันเอง อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติดังกล่าวสามารถซับได้เฉพาะคราบน้ำมันเท่านั้น ไม่เกี่ยวกับสารตกค้างขนาดเล็กอื่นๆ ที่อาจจะปนเปื้อนอยู่ในน้ำ จากการศึกษาพบว่า ดอกของต้นฐูปะธานีสามารถดูดซับน้ำมันได้ดี เพราะโครงสร้างมีส่วนประกอบของคาร์บอนเหมือนน้ำมันจึงจับตัวเข้าด้วยกันได้ดี และสามารถดูดซับได้เฉพาะคราบน้ำมันเท่านั้น

Yuan-Qing Li (2557) ทำการวิจัยสังเคราะห์วัสดุดูดซับจากชีวมวลให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนแอโรเจล ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและไพโรไลซิส โดยใช้ฟักเขียวเป็นวัสดุหลัก ฟักเขียวที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แล้ว จะมีความหนาแน่นที่ต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 0.048 กรัม/ลบ.ซม. มีความไม่ชอบน้ำสูง วัตค้ำมัมสัมผ้สน้ำได้สูงถึง 135° มีความจำเพาะในการดูดซับสารละลายอินทรีย์และน้ำมัน และมีความสามารถในการดูดซับสารละลายอินทรีย์และน้ำมันสูงถึง 16-50 เท่าโดยน้ำหนัก นอกจากนี้วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้น ยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ โดยใช้วิธีการกลั่นเพื่อนำสารที่ดูดซับแล้วออกไป หลังจากที่ดูดซับและกลั่นเอาสารละลายอินทรีย์และน้ำมันที่มีจุดเดือดต่ำออกเป็นจำนวน 5 รอบ พบว่าความสามารถในการดูดซับยังคงสูงเกือบ 100% เมื่อเทียบกับครั้งแรกที่ใช้งาน งานวิจัยนี้มีจุดเด่นที่วัสดุหลักราคาถูก กระบวนการสังเคราะห์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ความหนาแน่นต่ำ และมีความไม่ชอบน้ำสูง ซึ่งวัสดุดูดซับจากฟักเขียวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับน้ำมันได้จริงและช่วยป้องกันมลพิษทางน้ำ [51]

Zhen-Yu Wu (2557) ทำการวิจัยพัฒนาวัสดุดูดซับประสิทธิภาพสูง เพื่อป้องกันปัญหามลพิษทางน้ำจากน้ำมันและสารเคมีรั่วไหล โดยใช้คาร์บอนนาโนไฟเบอร์แอร์โรเจลวัสดุดูดซับเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ประสิทธิภาพการดูดซับของคาร์บอนนาโนไฟเบอร์แอร์โรเจลที่โดดเด่นนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่นต่ำ ความเป็นรูพรุนสูง เสถียรภาพเชิงกลที่ดีเยี่ยม สมบัติความไม่ชอบน้ำสูง และสมบัติความสามารถในการดึงดูดสารอินทรีย์ที่ยาว [52]

วีรยา วรคันธ์ และ คณะ การศึกษาการเสริมแรงของยางธรรมชาติด้วยซิลิกาผสมระหว่างเถ้าลอยและพรีซิพิเตดซิลิกา ด้วยการนำเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 ปริมาณ 2 % โดยน้ำหนัก มาทำการศึกษาปริมาณซิลิกาของเถ้าลอย 0-40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง และขนาดอนุภาคเถ้าลอยช่วงต่างๆ ที่น้อยกว่า 150 ไมครอน จากนั้นทำการเลือกปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยและขนาดอนุภาคเถ้าลอยที่เหมาะสมไป ศึกษาต่อด้วยการนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงร่วมกับ พรีซิพิเตดซิลิกาด้วยสัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 ซึ่งทำการศึกษาทั้งระบบที่ไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงผิวพรีซิพิเตดซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก โดยทำการตรวจสอบสมบัติของสารประกอบยางธรรมชาติด้านลักษณะการคงรูปร่าง สมบัติด้านความทนทานแรงดึง ความทนทานการฉีกขาด และความต้านทานการขูดถู จากการทดลอง พบว่า การเติมซิลิกาผสมปริมาณ 10 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ทั้งกรณีไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงผิวพรีซิพิเตดซิลิกาให้ลักษณะการคงรูปร่างและสมบัติเชิงกลโดยรวมของสารประกอบยางธรรมชาติไม่แตกต่างกันในทุกสัดส่วนของซิลิกาผสม ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาผสมปริมาณ 40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง มีสัดส่วนของพรีซิพิเตดซิลิกามากกว่า 25% ให้สมบัติเชิงกลด้านต่างๆ แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างระบบที่ไม่ปรับปรุงผิวกับปรับปรุงผิวพรีซิพิเตดซิลิกา ซึ่งการปรับปรุงผิวพรีซิพิเตดซิลิกาช่วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารประกอบยางธรรมชาติให้สูงขึ้นมาก นอกจากนี้ยังพบว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาผสมด้วยเส้นใยขนาดน้อยกว่า 25 ไมครอน ให้ลักษณะการคงรูปยางและสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการเติมด้วยเส้นใยขนาดอนุภาคในช่วง 45-74 ไมครอน [53]

**τριβυνηα μολυβδ και κωνε** ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารที่ใช้ก่อฟองต่อสมบัติโฟมยางพาราธรรมชาติโดยใช้รำสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติม โดยใช้สารทำให้เกิดฟองสองชนิดคือ อะโซไดคาร์บอเนต (ADC) และ ออกซิปีสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (OBSH) ในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าเมื่อใส่สารที่ทำให้เกิดฟองมากขึ้น โฟมยางพาราธรรมชาติจะมีความคงรูปมากยิ่งขึ้น แต่ความหนาแน่นของโฟมยางพาราธรรมชาติจะลดลงโดยในกรณีของการใช้สารก่อฟอง OBSH พบว่า โฟมยางธรรมชาติจะมีความแข็งแรงลดลง ในขณะที่ ADC จะมีความแข็งแรงต่ำสุดเมื่อใช้ในอัตราส่วน 2 phr และการใช้สารก่อฟอง OBSH จะมีรูพรุนในโฟมยางพาราธรรมชาติสม่ำเสมอกว่าการใช้สารก่อฟอง ADC [54]

## 2.12 เทคนิคและเครื่องมือวัด [55,56]

### 2.12.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการสั่นของโมเลกุลอินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีเลขคลื่น (Wave number) อยู่ในช่วงประมาณ 12,800 ถึง 10  $\text{cm}^{-1}$  หรือช่วงความยาวคลื่นจาก 0.78-1000  $\mu\text{m}$  ช่วงของอินฟราเรดแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near IR region) เป็นช่วงที่อยู่ใกล้กับช่วงวิสิเบิล พบว่าแถบการดูดกลืน (Absorption band) ที่ได้ค่อนข้างต่ำ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds)

- ช่วงกลางอินฟราเรด (Middle IR region) ช่วงนี้แบ่งออกเป็น Group frequency region อยู่ระหว่าง 4000-1300  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่ได้จากพวกหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) แต่ไม่ให้โครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์และ Fingerprint region อยู่ระหว่าง 1300-200  $\text{cm}^{-1}$  สเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จึงค่อนข้างยุ่งยาก การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบโครงสร้างแล้ว

- ช่วงไกลอินฟราเรด (Far IR region) ช่วงนี้ไม่ค่อยได้ใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากสเปกตรัมช่วงนี้มักเกิดจากการสั่นของโครงสร้างหรือเกิดการหมุนของโมเลกุล ช่วงนี้อยู่ระหว่าง 200-10  $\text{cm}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<sup>1</sup> สำหรับช่วงเลขคลื่นที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์นั้น เป็นช่วงกลางอินฟราเรดเป็นส่วนใหญ่ คือ  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  กระบวนการดูดกลืนแสงอินฟราเรด โมเลกุลของสารจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ต้องมีลักษณะ และสภาวะที่เหมาะสม คือ

1. รังสีหรือแสงนั้นจะต้องมีพลังงานพอเหมาะพอดีที่จะทำให้เกิดทรานซิชัน
2. ต้องเกิดการคู่ควบ (Coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้น เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไปตั้งนั้นเมื่อแสงอินฟราเรดผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารใดก็ตาม แล้วเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างข้างบนนี้เรียกรวมกันว่า IR active ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่แสดงว่าสารนั้นเป็น IR inactive ถือว่าไม่มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรด ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่มากจะได้พีคแถบดูดกลืนสูง ถ้าเปลี่ยนแปลงน้อยจะได้พีคแถบดูดกลืนต่ำ

#### 2.12.1.1 การเตรียมสารตัวอย่าง

##### สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

1. เทคนิคมัลล์ (Mull technique) เป็นวิธีการเตรียมสารโดยการบดสารใน Mineral oil เช่น นูจอล (Nujol) การเตรียมสารที่เป็นของแข็งมักมีปัญหาเกี่ยวกับการกระเจิงแสง จึงแก้ปัญหาโดยการบดสารตัวอย่างให้เป็นผงละเอียด และให้แขวนลอยในของเหลวที่มีดัชนีหักเหใกล้เคียงกับของแข็ง เพื่อตัดการกระเจิงแสง
2. วิธีการอัดเม็ด (Pellet method) วิธีนี้ให้ของแข็งแขวนลอยในเม็ดโพแทสเซียมโบรไมด์ซึ่งถูกอัดด้วยความดันสูงด้วยเครื่องไฮดรอลิก เม็ดของสารตัวอย่างโปร่งแสง จึงใช้วิเคราะห์คุณภาพและปริมาณได้
3. เทคนิคฟิล์ม (Film technique) ทำได้โดยตัดวางตัวอย่างให้เป็นแผ่นบางๆ โดยใช้เครื่องตัดหรือหลอมสารตัวอย่างแล้วทิ้งให้แห้งจนได้เป็นแผ่นฟิล์ม
4. วิธีเตรียมสารตัวอย่างให้เป็นของเหลว นำตัวอย่างมาละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยมีของแข็งประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

##### สารตัวอย่างที่เป็นของเหลว

ตัวอย่างที่เป็นของเหลววิเคราะห์ได้ในสภาพของเหลวที่บริสุทธิ์โดยเตรียมใส่เซลล์ที่มีความหนาพอประมาณ ถ้าใช้ตัวทำละลายต้องเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวทำละลายดูดกลืนแสงอินฟราเรด

## สารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส

ตัวอย่างที่เป็นแก๊สในเซลล์บรรจุแก๊สที่เป็นหลอดแก้วคล้ายท่อมีหน้าต่างทำด้วยโซเดียมคลอไรด์โพแทสเซียมโบรไมด์หรือ แคลเซียมฟลูออไรด์

### 2.12.1.2 ประเภทของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

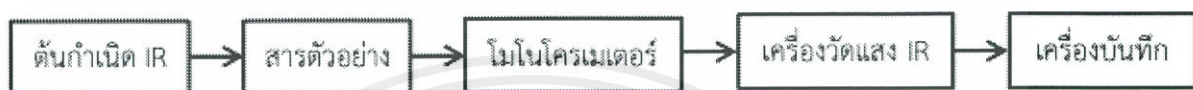
1) เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ใช้ระบบกระจายแสง (Dispersive infrared spectrophotometer) ซึ่งมีทั้งลำแสงเดี่ยว (Single beam) และชนิดลำแสงคู่ (Double beam) แต่ลำแสงคู่เป็นเครื่องที่ได้รับความนิยมมากกว่า และพบเห็นโดยทั่วไปเพราะแบลคกราวนด์ (Background) ที่เกิดจากแก๊สในบรรยากาศเช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ จะหมดปัญหาไป

2) เครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) โดยทั่วไปเครื่องมือทางสเปกโทรสโคปี นั้นมักใช้หลักการกระจายแสงของสเปกตรัม การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่สนใจ เป็นตัวกำหนด เช่น ในช่วงของอินฟราเรดดังที่กล่าวมาแล้ว จากการบันทึกผลของค่าความเข้มข้นของแสงต่อความถี่ หรือความยาวคลื่นซึ่งได้ออกมาเป็นสเปกตรัมเรียกว่า Frequency-domain spectrum ดังที่เป็นกันอยู่ แต่ถ้าใช้วิธีการวัดต่างไปโดยวัดความเข้มข้นของแสงหรือกำลังของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลาเรียกว่า Time-domain spectroscopy หรือโดยทั่วไปเรียก Fourier Transform Spectroscopy ซึ่งจะให้สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆพร้อมกันหมด ดังนั้นจึงสามารถช่วยให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น การแยก (Resolution) ก็ดีขึ้น หรือเป็นการทำให้ Signal-to-noise ratio ดีขึ้นกว่าวิธีธรรมดา

ข้อดีของการใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม ที่เห็นได้ชัดๆก็คือ ช่วยให้การวิเคราะห์หรือการวัดสเปกตรัมของสารตัวอย่างทำได้เร็วกว่าเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ธรรมดาหลายเท่า เพราะการวัดด้วยเครื่องธรรมดาจะเป็นแบบวัดทีละความถี่ ส่วน FT-IR วัดที่ความถี่ต่างๆอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ง่าย และสะดวกขึ้นด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน ส่วนข้อเสีย คือ FT-IR เป็นเครื่องมือที่มีราคาแพง และต้องเสียค่าบำรุงรักษาสูง

ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดยทั่วไป มีส่วนประกอบสำคัญคือ

1. ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR Source)
2. เซลล์ที่ใส่ตัวอย่าง (Sample Cell)
3. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)
4. เครื่องวัดแสงอินฟราเรด (IR Detector)
5. เครื่องบันทึกสเปกตรัม (Recorder หรือ Readout Devices)



รูปที่ 2.11 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

### 2.1.2.2 การวัดพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนโดยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET)

[54-56]

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ เป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำวัสดุนั้น ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการหรือ ตามที่มาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะทำได้หลายวิธีแต่วิธีที่จะกล่าวในที่นี้เป็นการวัดปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูก ดูดซับบนผิวของวัสดุแล้วนำมาคำนวณเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของวัสดุ

#### ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเบื้องต้น

บรูเนอร์เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการ ดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุดังแสดงในภาพที่ 2.10 พบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือ แพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุล หลายชั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถ เขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ ( $W$ ) กับความดันสัมพันธ์ ( $P/P_0$ ) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น เป็นสมการที่ เรียกว่า “สมการของ BET” ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{W \left[ \left( \frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C-1}{W_m C} \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

โดย  $W$  = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ ความดันสัมพัทธ์  $P/P_0$

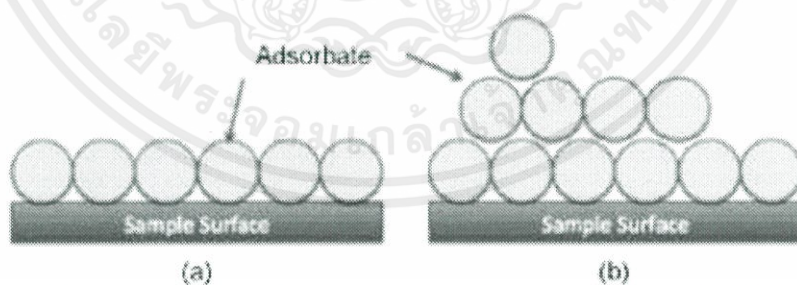
$W_m$  = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ เคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็น โมเลกุลชั้นเดียว

$P$  = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะที่ ทำการทดลอง (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)

$P_0$  = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (หน่วย เป็นมิลลิเมตรปรอท)

$C$  = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

รูปที่ 2.12 แสดงการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ



รูปที่ 2.13 แสดงการดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้นๆ

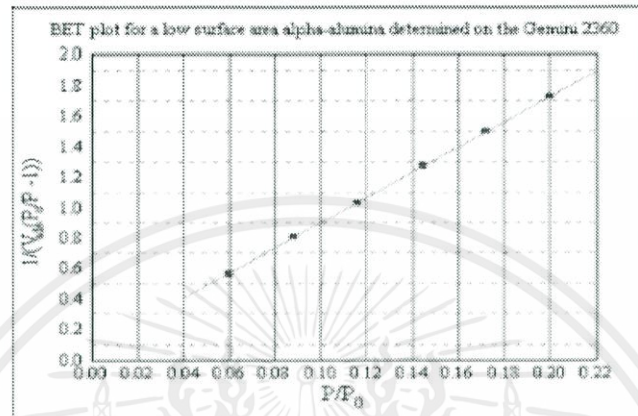
จากความสัมพันธ์สมการ BET เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $1/W [(P_0/P) - 1]$  กับ  $P/P_0$  จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงใน ภาพที่ 2.12 มีความชัน (Slope,  $s$ ) ดังสมการ ;

$$s = \frac{C-1}{W_m C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจุดตัดแกน y (y-intercept, i) ดังสมการ ;

$$i = \frac{1}{W_m C}$$



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์

ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุใน ลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว ( $W_m$ ) คำนวณโดยนำ  $s$  และ  $i$  แทนค่าในสมการ

$$W_m = \frac{1}{s + i}$$

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุคำนวณโดยนำ  $W_m$  แทนค่าในสมการ โดย

$St$  = พื้นที่ผิวของวัสดุ (หน่วยเป็นตารางเมตร)

$N$  = เลขอาโวกราโดร ( $6.023 \times 10^{23}$ ) (หน่วยเป็น โมเลกุลต่อโมล)

$M$  = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (28 กรัมต่อ โมล)

$A_{cs}$  = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูก ดูดซับ ( $16.2 \times 10^{-23}$ ) (หน่วยเป็นตารางเมตร)

ค่า  $St$  ที่ได้เมื่อหารด้วยปริมาณของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทดสอบ ( $w$ ) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \frac{S_t}{W}$$

ปริมาตรรูพรุนรวม ( $V_p$ ) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ( $r_p$ ) ของวัสดุคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$V_p = \frac{W_s}{P}$$

$$\bar{r}_p = \frac{2V_p}{S_t}$$

โดย  $W_s$  = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ )  $\approx$  1

$r$  = ความหนาแน่นของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบน ผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ )  $\approx$  1

$S_t$  = พื้นที่ผิวของวัสดุที่ทดสอบได้

ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน ดังแสดงในภาพที่ 4 ใช้เซลล์สำหรับใส่ ตัวอย่าง (Sample cell) จำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุ ตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่ วัสดุตัวอย่างแต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบ ต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิวหน้าของ วัสดุตัวอย่าง

จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศ เพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น ก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำจากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่าง จะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่าง ลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีวัสดุตัวอย่างความดันของแก๊สไนโตรเจนจะคงที่ ( $P_0$ ) ข้อมูลที่ เครื่องบันทึกผลคือค่าความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) และปริมาณของ แก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (W) โดยวัสดุตัวอย่าง จากนั้นเครื่อง จะปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก และ แก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเป็นเช่นนี้จนกระทั่ง ความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง ( $P/P_0 \cong 1$ ) แสดงว่า ไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้ว จากข้อมูลค่าความดัน สัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับที่ได้เครื่อง ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผล ออกมา เป็น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน



รูปที่ 2.15 แสดงเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

### 2.12.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) [57]

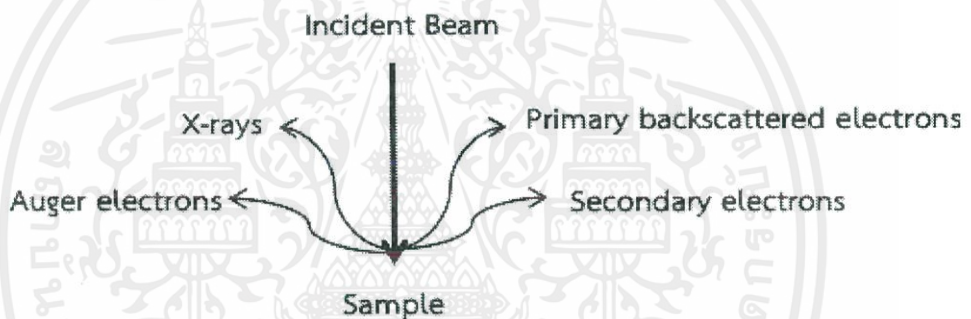
เป็นเทคนิคที่เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม ที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพที่ปรากฏบนจอรับภาพต่อไป เทคนิคนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายสาขา เช่น วัสดุศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์ซึ่งมีจุดเด่นที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่

- (1) สามารถให้ภาพที่มีความชัดลึกสูง (High Depth of Field)
- (2) สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงสูง (High Spatial Resolution)
- (3) สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อเป็นข้อมูลเชิงเคมีโดยเครื่องมือที่ใช้เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.12.3.1 หลักการทำงานของ SEM

เมื่อจากการผ่านลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ผ่านชุดเลนส์รวมแสง (Condenser Lens) ซึ่งทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้มีขนาดแคบลง เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งสู่เบ้าส่องผ่านเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งมีหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดีและลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scanning Coil) ของลำอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวที่ระดับต่างๆทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณชนิดต่างๆ ออกมา ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.16 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง

สัญญาณที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆที่เกิดขึ้น คือ

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำประมาณ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์เกิดที่ผิวระดับไมลิก (ไม่เกิน 10 นาโนเมตร) โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวอิเล็กตรอนต่ำ
2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่เสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วนและกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง
3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัว เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดพลังงานภายในเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

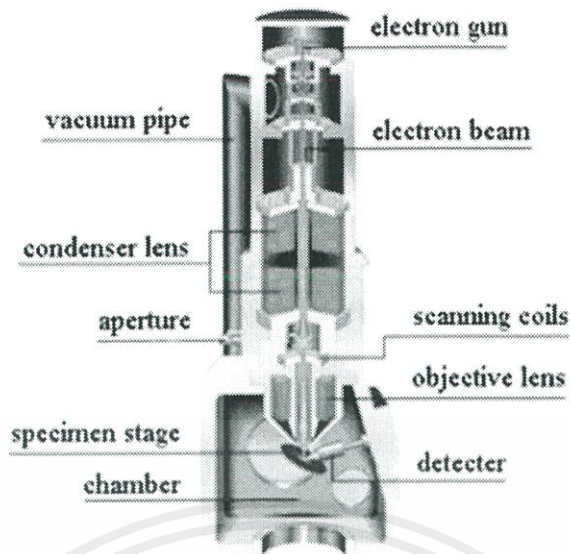
อิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีพลังงานสูงกว่าโดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงจรรอออกมา ทำให้อิเล็กตรอนต้องรักษาสมดุลของโครงสร้างภายในอะตอม โดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่า โดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่เข้ามาแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามลำดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ

### 2.12.3.2 ส่วนประกอบของ SEM

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูป 2.15 และมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ในท่อสุญญากาศ โดยหน้าที่ของส่วนประกอบแต่ละอันมีรายละเอียดดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) โดยทั่วไปใช้ขดลวดทังสเตนอิเล็กตรอนที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ
- 2) เลนส์รวมแรง (Condenser Lens) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนมีขนาดและความเข้มข้นเหมาะสมกับตัวอย่าง เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดที่สุดที่กำลังขยายที่ต้องการ การลดขนาดของลำอิเล็กตรอนจะช่วยเพิ่มขนาดของกำลังขยาย
- 3) ขดลวดสำหรับการส่องกราด (Scanning Coil) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่าง
- 4) เลนส์วัตถุ (Objective Lens) เป็นเลนส์ที่ทำให้อิเล็กตรอนเกิดภาพขั้นต้น อาศัยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายความคมชัดของภาพได้ โดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
- 5) ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอน (Detector) ตัวเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยเก็บสัญญาณแต่ละจุดจากปลายอิเล็กตรอน ปรากฏเป็นภาพบนจอภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แผนภาพขององค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องเป็นตัวอย่างที่นำไฟฟ้า และต้องทำให้แห้งด้วยการอบไล่ความชื้น ถ้าตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องนำมาทำเคลือบเพื่อให้นำไฟฟ้า การเคลือบจะช่วยลดการสะสมของประจุและเพิ่มปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ส่วนมากใช้ทองเป็นโลหะเคลือบ เทคนิคที่นิยมใช้ได้แก่การสปัตเตอร์ (Sputtering) การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์สำหรับ SEM ในระบบวิเคราะห์แบบ Energy Dispersive Spectrometry (EDS) มีหลักการวิเคราะห์คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรในชั้นของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงเกินพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ของชั้นโคจรจึงหลุดออกจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรจากนั้น อะตอมของวงโคจรชั้นถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงมีค่าพลังงานเฉพาะค่า เรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว ซึ่งแสดงกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุดูดซับเส้นใยคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนสูงจากดอกธูปฤาษีโดยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการดูดซับคราบน้ำมัน โดยจะศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน และอัตราส่วนเส้นใยคาร์บอนจากธูปฤาษีต่อพอลิเมอร์จากน้ำยางพาราในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุดูดซับคาร์บอนพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการโซโวลเทอร์มัล จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเงื่อนไขไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันต่อการดูดซับคราบน้ำมัน

#### 3.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยคาร์บอนจากดอกธูปฤาษี

การศึกษาสมบัติของเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) โดยการนำเส้นใยจากดอกธูปฤาษีปกติ และเส้นใยคาร์บอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชัน นำไปทดสอบวิเคราะห์หาสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)
2. ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) บนพื้นผิวของตัวอย่างโดยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)
3. ศึกษาพื้นที่ผิว (Surface area), เส้นผ่านศูนย์กลางและปริมาตรของรูพรุนของตัวอย่างโดยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET)
4. ศึกษาความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ด้วยการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ของตัวอย่างโดยเครื่อง Contact angle (CA) ซึ่งจะต้องเตรียมตัวอย่างให้มีลักษณะเป็นแผ่นเพื่อให้สามารถวัดความไม่ชอบน้ำได้ โดยใช้เครื่องอัดเม็ดในการเตรียมตัวอย่างหรือเตรียมบนแผ่นกระจก (Glass Slide)

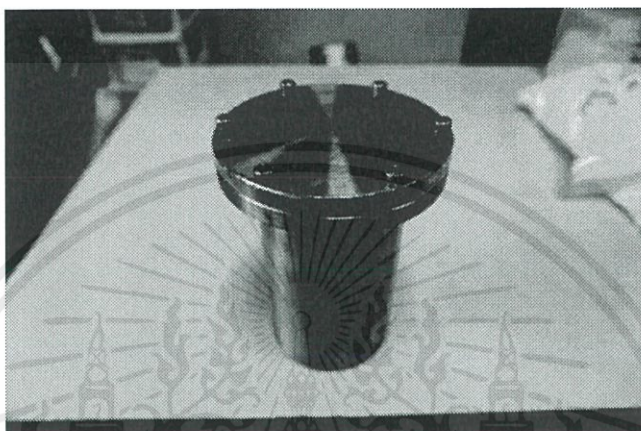
หลังจากการวิเคราะห์ข้างต้นแล้ว ก็นำดอกธูปฤาษีและเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันไปทำการทดสอบการดูดซับน้ำมันดังนี้ น้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Motor oil) น้ำมันดิบ (Crude oil) และน้ำมันที่ไม่ได้คุณภาพ (Slop oil) เป็นต้น จากนั้นนำเส้นใยคาร์บอนและดอกธูปฤาษีที่ผ่านการดูดซับน้ำมันแล้ว ไปวัดค่าพลังงานด้วยเครื่อง Bomb

calorimeter และหาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมัน (%) เพื่อเปรียบเทียบว่าเส้นใยคาร์บอนในเงื่อนไขใดมีการดูดซับน้ำมันได้ดีที่สุด

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.2.1 อุปกรณ์

1. ถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Autoclave)



รูปที่ 3.1 ถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Autoclave)

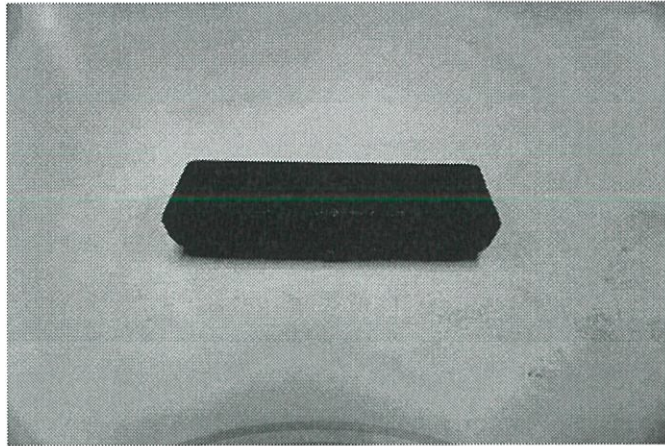
2. ภาชนะที่เป็นเทฟลอนสำหรับใส่ในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Teflon)



รูปที่ 3.2 ภาชนะที่เป็นเทฟลอน (Teflon)

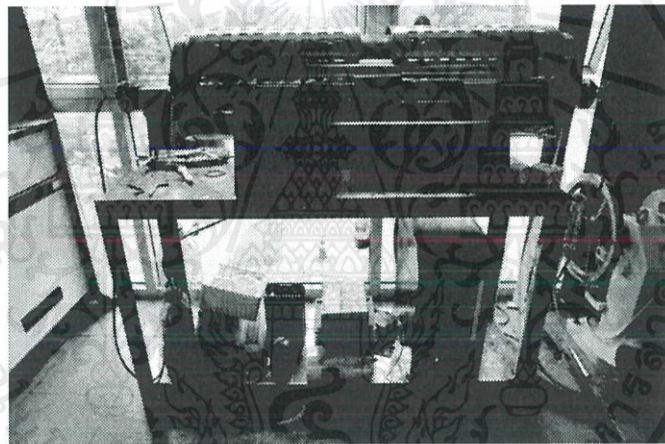
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ภาชนะใส่สารสำหรับทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชัน (Boat)



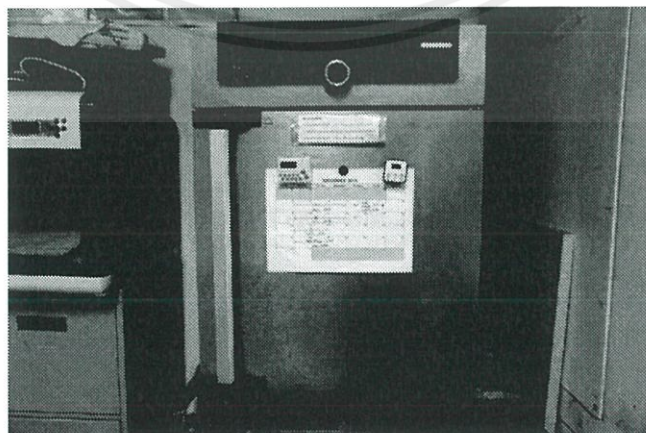
รูปที่ 3.3 ภาชนะใส่สารสำหรับเผา (Boat)

4. เตาเผาสารแบบแนวนอน (Horizontal Tube Furnace)



รูปที่ 3.4 เตาเผาสารแบบแนวนอน (Horizontal Tube Furnace)

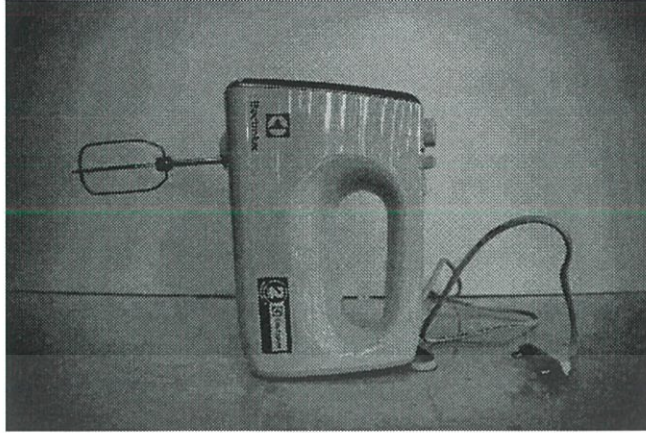
5. ตู้อบ (Oven)



รูปที่ 3.5 ตู้อบ (Oven)

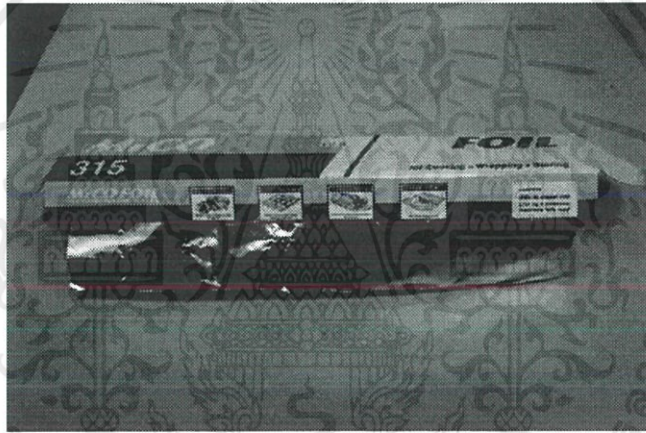
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. เครื่องปั่นผสมอาหาร (Food Mixer)



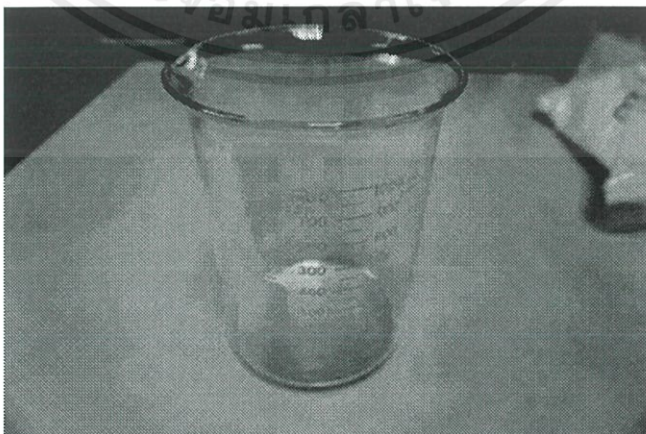
รูปที่ 3.6 เครื่องปั่นผสมอาหาร (Food Mixer)

## 7. ฟอยล์อะลูมิเนียม (Aluminium Foil)



รูปที่ 3.7 ฟอยล์อะลูมิเนียม (Aluminium Foil)

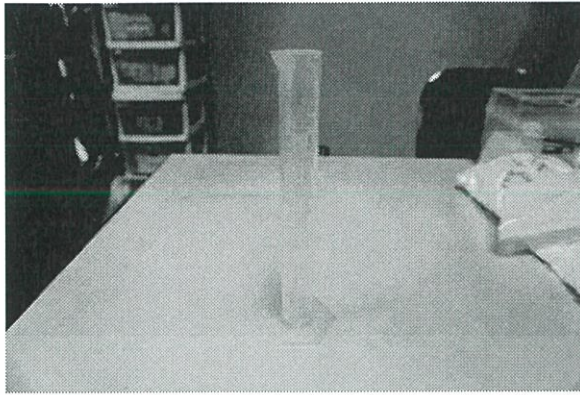
## 8. ปีกเกอร์ (Beaker)



รูปที่ 3.8 ปีกเกอร์ (Beaker)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9. กระบอกลวง (Cylinder)



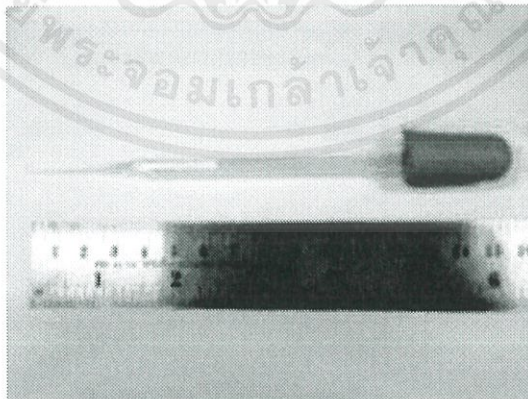
รูปที่ 3.9 กระบอกลวง (Cylinder)

## 10. ช้อนตักสาร (Spatula)



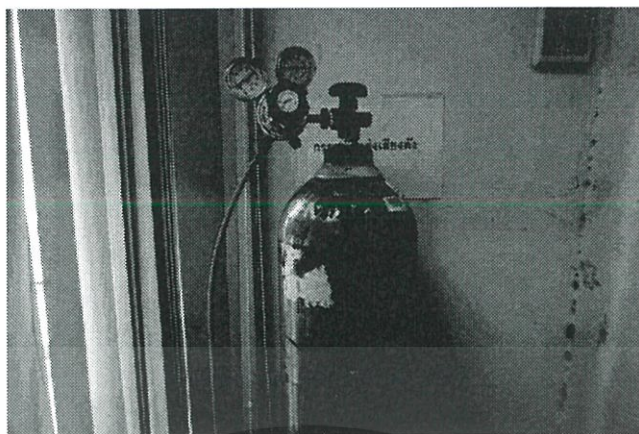
รูปที่ 3.10 ช้อนตักสาร (Spatula)

## 11. หลอดดูดสาร (Chemical Suction Tube)



รูปที่ 3.11 หลอดดูดสาร (Chemical Suction Tube)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ถังแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$  gas)รูปที่ 3.12 ถังแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$  gas)

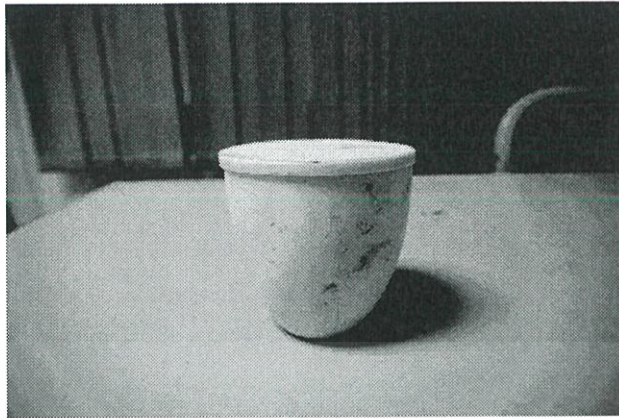
## 13. เตาเผาแบบสี่เหลี่ยม (Furnace box)



รูปที่ 3.13 เตาเผาแบบสี่เหลี่ยม (Furnace box)

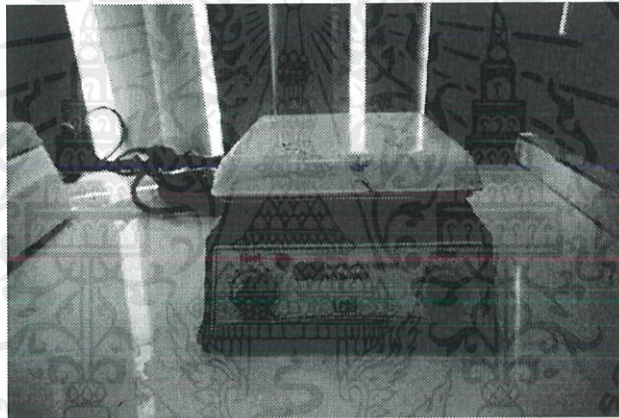
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 14. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (Crucible)



รูปที่ 3.14 ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (Crucible)

## 15. เครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer)



รูปที่ 3.15 เครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer)

## 16. แม่พิมพ์ (Mold)

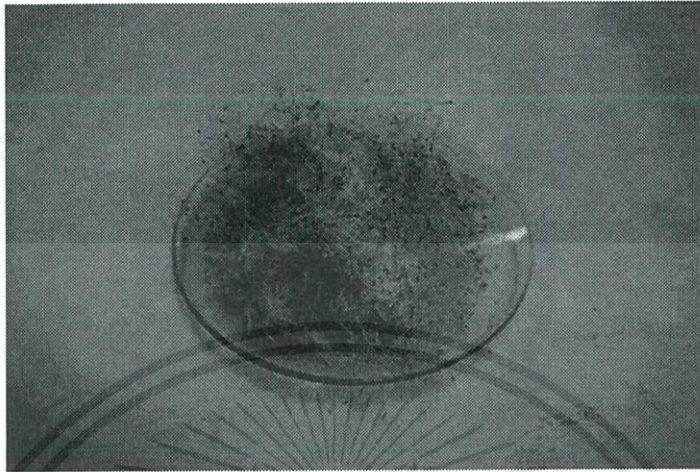


รูปที่ 3.16 แม่พิมพ์ (Mold)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

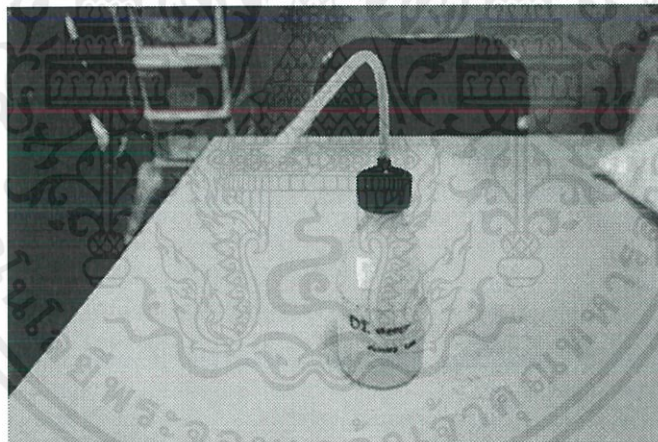
### 3.2.2 วัสดุและสารเคมี

#### 1. ดอกธูปฤาษี (Cattail Flower)



รูปที่ 3.17 ดอกธูปฤาษี (Cattail Flower)

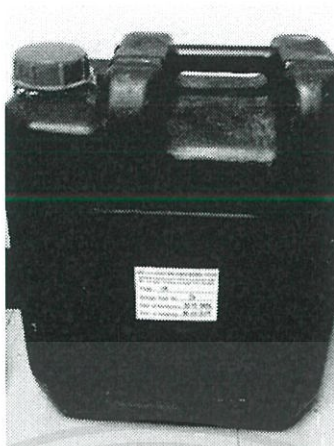
#### 2. น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water)



รูปที่ 3.18 น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water)

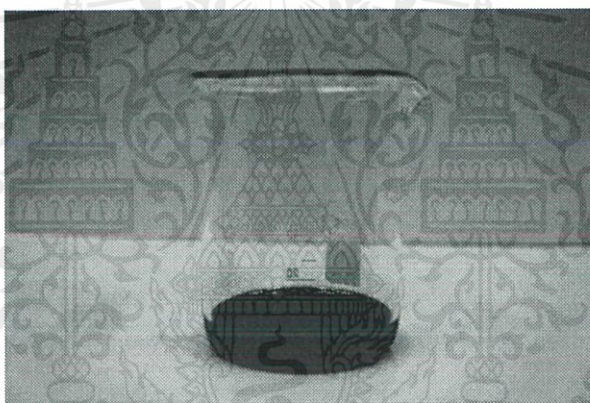
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3. น้ำยางพารา (Latex)



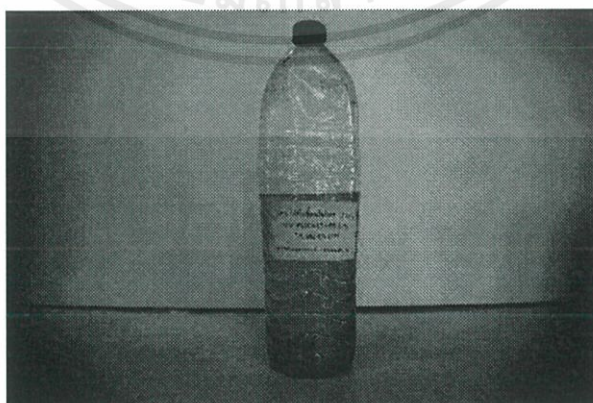
รูปที่ 3.19 น้ำยางพารา (Latex)

## 4. น้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil)



รูปที่ 3.20 น้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil)

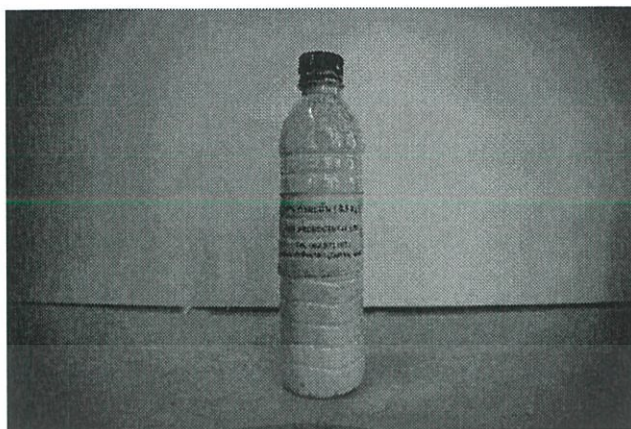
## 5. โพแทสเซียมโอเลต (Potassium Oleate)



รูปที่ 3.21 โพแทสเซียมโอเลต (Potassium Oleate)

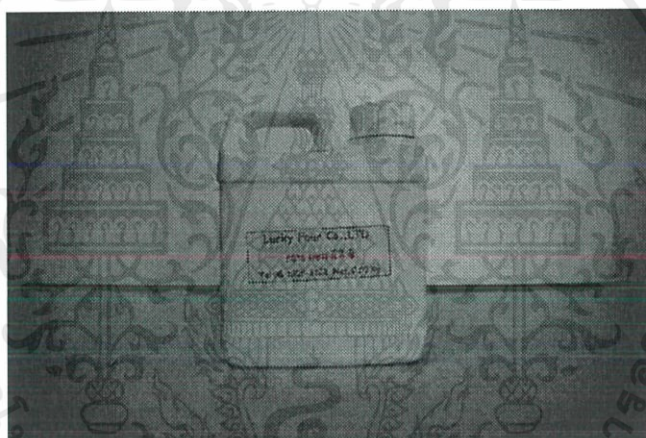
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. กำมะถัน (Sulfur)



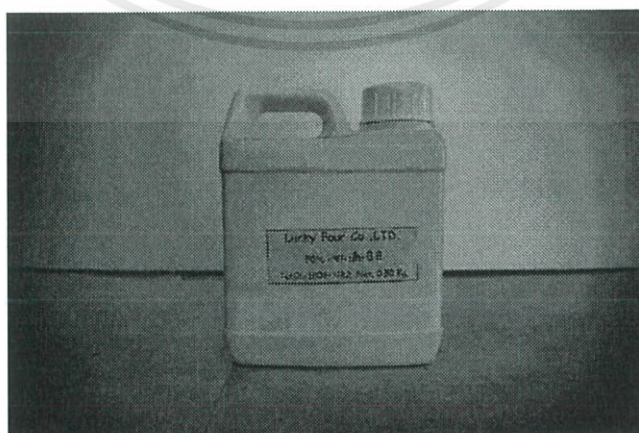
รูปที่ 3.22 กำมะถัน (Sulfur)

## 7. แซดดีอีซี (ZDEC)



รูปที่ 3.23 แซดดีอีซี (ZDEC)

## 8. แซดเอ็มบีที (ZMBT)



รูปที่ 3.24 แซดเอ็มบีที (ZMBT)

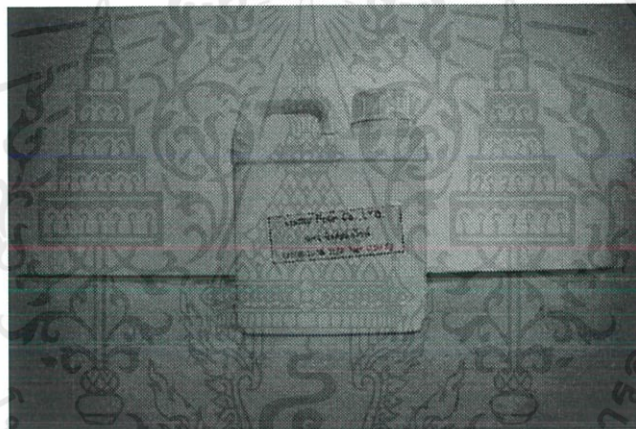
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9. วิงสเตย์แอล (Wingstay L)



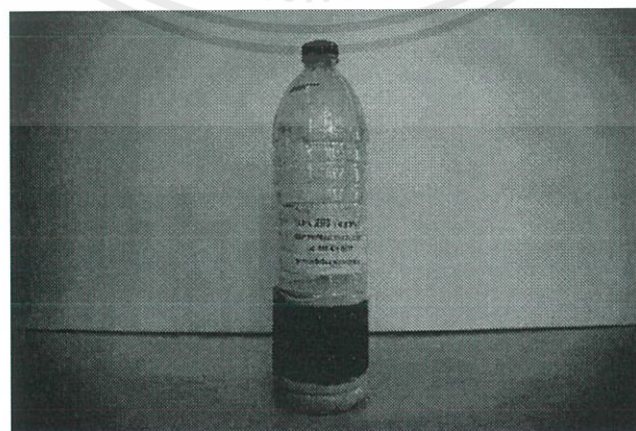
รูปที่ 3.25 วิงสเตย์แอล (Wingstay L)

## 10. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)



รูปที่ 3.26 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

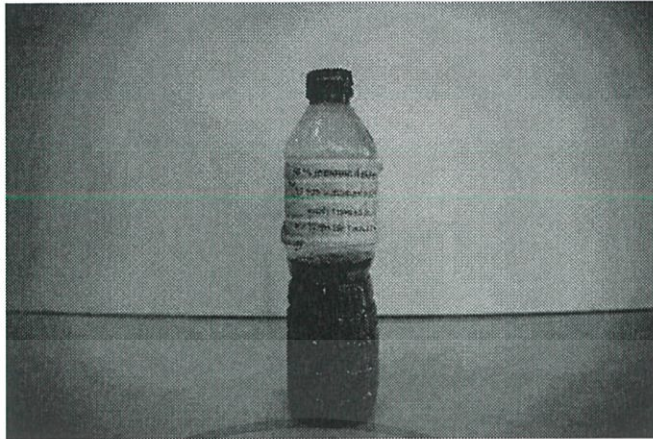
## 11. ดีพีจี (DPG)



รูปที่ 3.27 ดีพีจี (DPG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11. เอสเอสเอฟ (SSF)



รูปที่ 3.28 เอสเอสเอฟ (SSF)

### 3.2.3 เครื่องวิเคราะห์

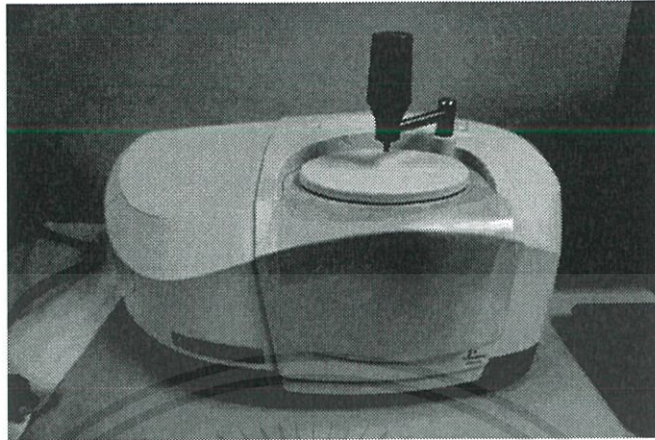
1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)



รูปที่ 3.29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)



รูปที่ 3.30 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

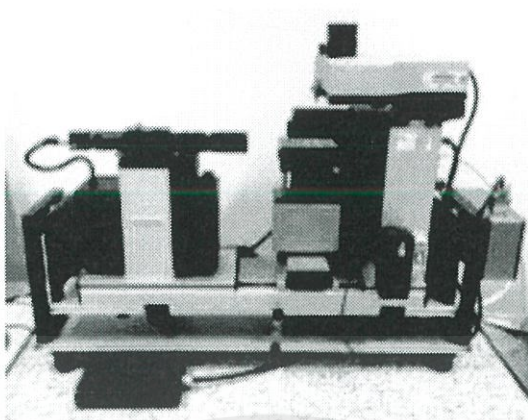
3. Sorption Apparatus



รูปที่ 3.31 Sorption Apparatus

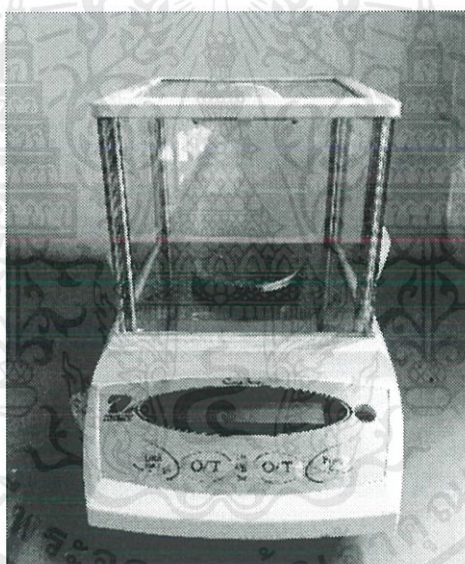
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. Contact angle (CA)



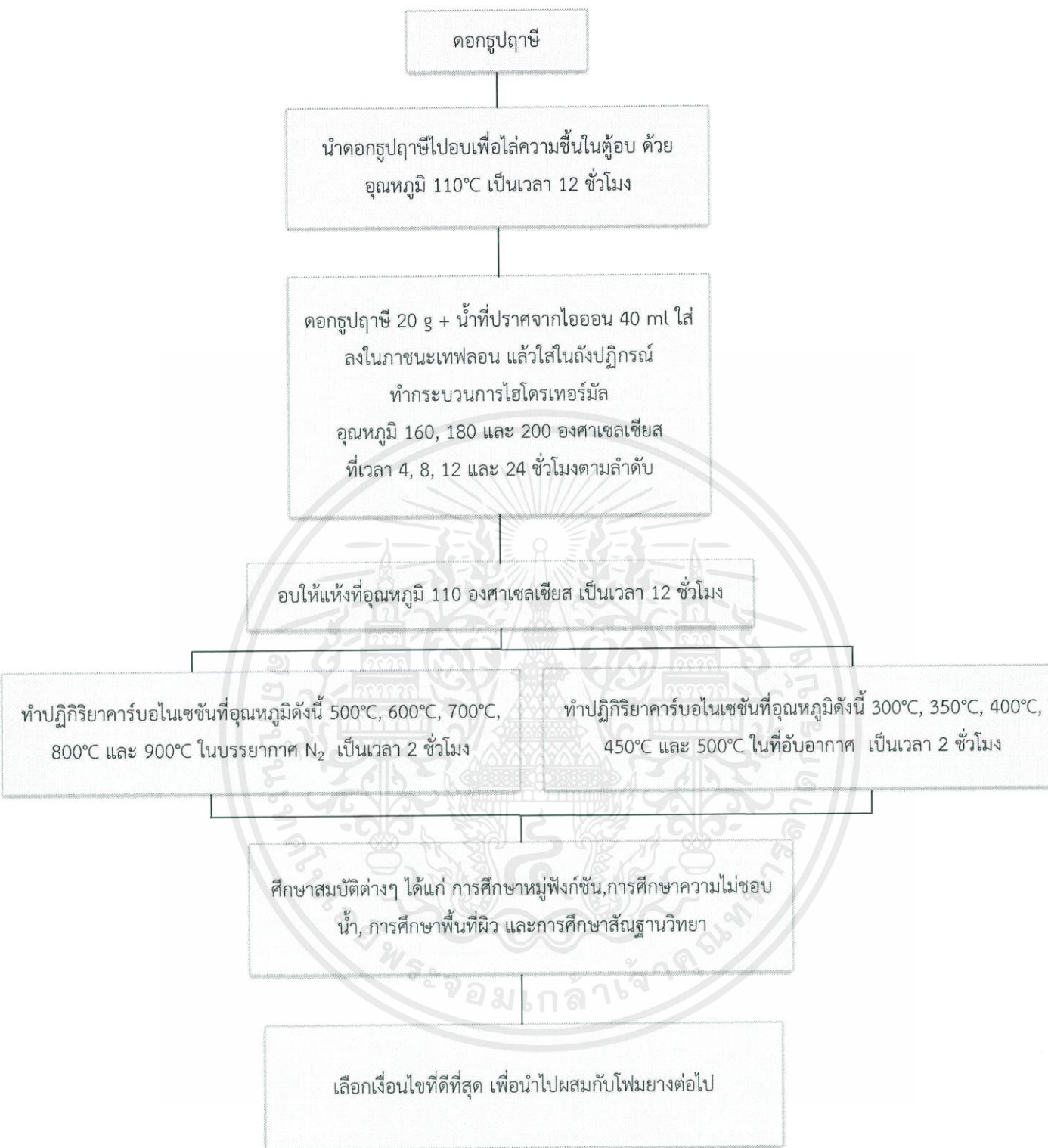
รูปที่ 3.32 Contact angle

## 5. Analytical balance



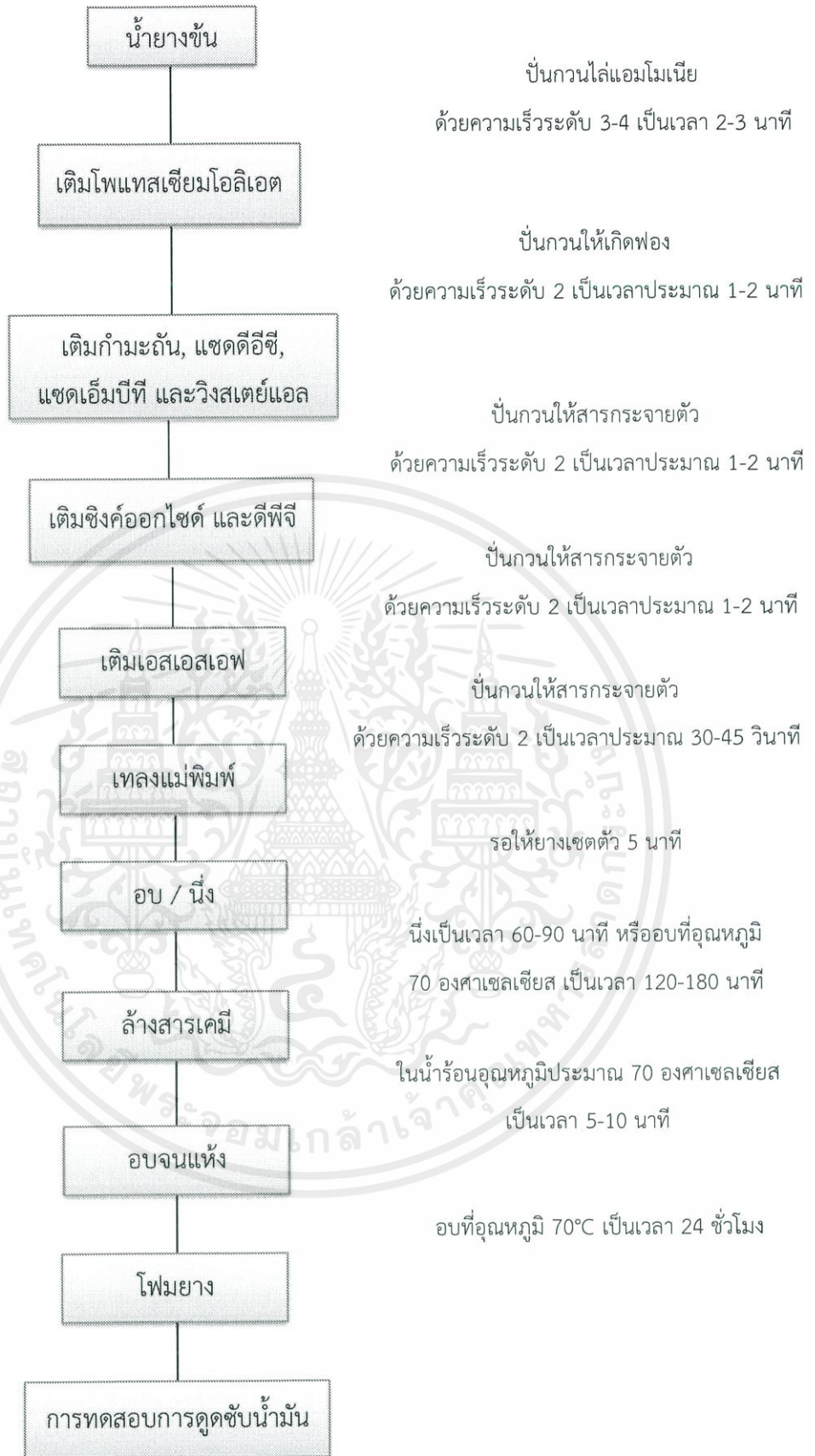
รูปที่ 3.33 Analytical balance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมเส้นใยคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



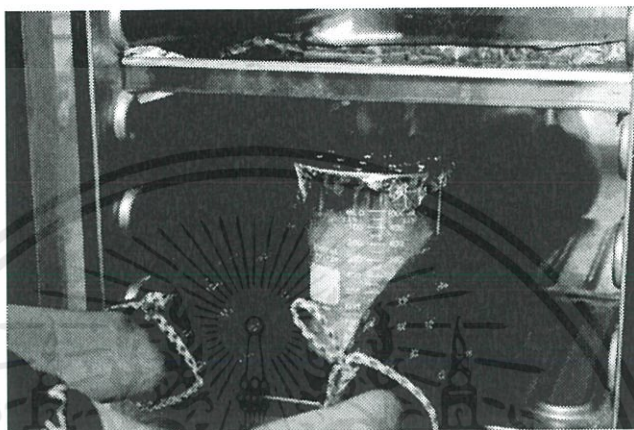
รูปที่ 3.35 แผนภาพแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโม่ยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเตรียมดอกธูปฤๅษี

3.3.1 ตัดดอกธูปฤๅษีจากต้นธูปฤๅษี โดยเลือกแต่ช่อดอกที่มีสีน้ำตาล

3.3.2 แกะดอกธูปฤๅษีออกจากช่อให้เป็นเส้นใยเล็กๆ แล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบ ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกว่าความชื้นจะหมด



รูปที่ 3.36 นำดอกธูปฤๅษีที่แกะแล้ว มาอบไล่ความชื้น

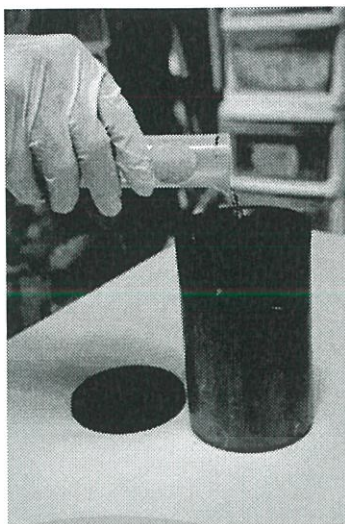
### 3.4 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตรจากดอกธูปฤๅษี

การศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตรจากดอกธูปฤๅษี โดยอาศัย 2 กระบวนการร่วมกัน คือ กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และกระบวนการคาร์บอนเซชัน สามารถแบ่งการทดลอง ย่อยได้เป็น 2 การทดลองดังนี้

3.4.1 ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีรูพรุน โดยอาศัยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนเซชัน

1. ชั่งดอกธูปฤๅษีที่ทำการอบไล่ความชื้นแล้ว 20 กรัม
2. นำดอกธูปฤๅษีที่ชั่งแล้วทั้งหมด 20 กรัม ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน (De-ionized water) 40 มิลลิลิตร แล้วใส่ลงในภาชนะที่เป็นแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.37 ดอกธูปฤๅษีผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออนในสถานะที่เป็นเฟลออน

3. จากนั้นนำสถานะที่เป็นแก้วใสในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Reactor) นำถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Reactor) เข้าตู้อบในเงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาต่างๆ ดังนี้ 160°C, 180°C และ 200°C เป็นเวลา 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.38 (A) นำสถานะที่เป็นเฟลออนใสในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Reactor) และ (B) นำถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลเข้าตู้อบ (Oven)

4. นำดอกธูปฤๅษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้วใส่ในสถานะ จากนั้นใส่ในตู้อบเพื่อไล่ ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากอบจนแห้งสนิทแล้วชั่งน้ำหนัก ตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล แล้วเก็บตัวอย่างใส่ในสถานะปิด

5. นำดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้วอบจนแห้งสนิทมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิดังนี้ 500°C, 600°C, 700°C, 800°C และ 900°C ในบรรยากาศไนโตรเจน (N<sub>2</sub> Atmosphere) เป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที (°C/min) และความเร็วแก๊ส 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที (CC/min) โดยใช้เตาเผาแบบแนวนอน (Horizontal Tube Furnace) และใช้ท่อในการทำคาร์บอไนเซชันเป็นท่อควอตซ์ (Quartz Tube)

### 3.5 การเตรียมวัสดุคูดซับโฟมยางผสมคาร์บอนไฟเบอร์จากดอกธูปฤาษี

ขึ้นรูปวัสดุคูดซับโฟมยางผสมคาร์บอนไฟเบอร์จากดอกธูปฤาษี (Carbon fiber rubber foam) ด้วยกระบวนการดันลอป (Dunlop process) ซึ่งมีสูตรการผสมสารเคมีภายในการผลิตโฟมยางดังนี้

ตารางที่ 3.1 สูตรการผสมสารเคมีภายในการผลิตโฟมยาง

น้ำยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr*)
น้ำยางชั้น	100
โพแทสเซียมโอเลเอต (Potassium Oleate)	20
50% กำมะถัน (Sulfur)	5.0
50% แซตดีอีซีซี (ZDEC)	2.0
50% แซตเอ็มบีที (ZMBT)	2.0
50% วิงสเตย์แอล (Wingstay L)	2.0
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	5.0
33% ดีพีจี (DPG)	1.4
12.5% เอสเอสเอฟ (SSF)	0.5
เส้นใยคาร์บอนจากดอกธูปฤาษี (Carbon fiber)	1

phr\* : part per hundred of rubber (ส่วนในร้อยส่วนของยางโดยน้ำหนัก)

### ขั้นตอนการทำโพนยางมีดังต่อไปนี้

1. นำน้ำยางมาปั่นจนเพื่อไล่แอมโมเนีย โดยใช้เครื่องตีผสมอาหารที่ความเร็วระดับ 3-4 เป็นเวลา 2-3 นาที หรือปั่นจนให้น้ำยางมีฟองเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า
2. เติมโปแตสเซียมโอเลต (Potassium Oleate) ปั่นจนที่ความเร็วระดับ 2 เป็นเวลาประมาณ 1-2 นาที
3. เติมกำมะถัน แซตตีอีซี แซตเอ็มพีที และวิงสเตย์แอล ปั่นจนที่ความเร็วระดับ 2 เป็นเวลาประมาณ 1-2 นาที
4. เติมซิงค์ออกไซด์ และดีพีจี ปั่นจนที่ความเร็วระดับ 2 เป็นเวลาประมาณ 1-2 นาที
5. เติมเอสเอสเอฟ ปั่นจนที่ความเร็วระดับ 2 เป็นเวลาประมาณ 30-45 วินาที
6. เทลงเข้าพิมพ์ รอให้ยางเซตตัว 5 นาที
7. นำยางไปนึ่ง เป็นเวลา 60-90 นาที หรืออบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120-180 นาที
8. ถ่างสารเคมีในยาง ด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-10 นาที
9. ทำการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

นำตัวอย่างดอกรูปภาณีปกติและดอกรูปภาณีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนเซชันไปทำ การวิเคราะห์เพื่อหาคุณลักษณะและคุณสมบัติในด้านต่างๆ

3.6.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) (ยี่ห้อเครื่อง Hitachi, s3400N) สารตัวอย่างจะต้องทำการเคลือบด้วยทอง (Au) โดยการ sputtering ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อให้พื้นผิวของตัวอย่างนำไฟฟ้า เมื่อยิงอิเล็กตรอนไปที่พื้นผิวของตัวอย่าง ก็จะทำให้พื้นผิวของตัวอย่างมีความคมชัดในการตรวจวัด โดยจะใช้กำลังขยาย คือ 500X และ 1000X ตามลำดับ

3.6.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) บนพื้นผิวของตัวอย่างโดยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) (ยี่ห้อเครื่อง NICOLET 6700) โดยจะใช้หัวเพชรและโหมด ATR ในการ วิเคราะห์ สแกนในช่วงระหว่างเลขคลื่นที่  $400\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $4000\text{ cm}^{-1}$

3.6.3 การศึกษาพื้นที่ผิว (surface area) โดยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET) การศึกษาพื้นที่ผิว (Surface area), เส้นผ่านศูนย์กลางและปริมาตรของรูพรุนของตัวอย่างโดยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET) (ยี่ห้อเครื่อง Quantachrome NOVA 2000e) ทำได้โดยการชั่งสารตัวอย่าง ประมาณ 0.1000 กรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET โดยจะทำการ degas ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากสารตัวอย่าง ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว

3.6.4 การศึกษาความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) โดยเครื่อง Contact angle (CA) การศึกษาความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ด้วยการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ของตัวอย่างโดยเครื่อง Contact angle (CA) (ยี่ห้อเครื่อง DATAPHYSICS, OCA40) ซึ่งจะต้องเตรียมตัวอย่างให้มีลักษณะเป็นเม็ด หรือเป็นแผ่นเพื่อให้สามารถวัดความไม่ชอบน้ำได้ โดยใช้เครื่องอัดเม็ดในการเตรียมตัวอย่างหรือเตรียมบนแผ่นกระจก (Glass Slide)

### 3.7 การทดสอบการดูดซับน้ำมัน

นำดอกธูปฤๅษีและเส้นใยนาโนคาร์บอนมาทดสอบการดูดซับน้ำมัน ในการทดลองการดูดซับน้ำมันทำโดยใช้น้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) น้ำมันดิบ (Crude oil) และน้ำมันที่ไม่ได้คุณภาพ (Slop oil) เป็นต้น สามารถแบ่งการทดสอบ การดูดซับน้ำมันได้เป็น 2 รูปแบบดังนี้

#### 3.7.1 การทดสอบการดูดซับน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM F 726-06

วิธีการทดสอบสามารถแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

1) ขั้นตอนแบบสั้น (15 นาที): ภายใต้เงื่อนไขของน้ำมันเครื่อง น้ำมันดิบและน้ำมันที่ไม่ได้คุณภาพ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ จากนั้นนำดอกธูปฤๅษีและเส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในปิ๊กเกอร์น้ำมันที่เตรียมไว้ หลังจาก 15 นาที นำเส้นใยนาโนคาร์บอนที่ผ่านการทดสอบออกจากปิ๊กเกอร์

2) ขั้นตอนแบบยาว (24 ชั่วโมง): ภายใต้เงื่อนไขของน้ำมันเครื่อง น้ำมันดิบ และน้ำมันที่ไม่ได้คุณภาพ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ จากนั้นนำดอกธูปฤๅษีและเส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในปิ๊กเกอร์น้ำมันที่เตรียมไว้ หลังจาก 24 ชั่วโมง (ภายในระบบปิด) นำเส้นใยนาโนคาร์บอนที่ผ่านการทดสอบออกจากปิ๊กเกอร์

ประสิทธิภาพในการดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 โดยที่  $w$  คือน้ำหนักเส้นใยนาโนคาร์บอน หลังการทดสอบการดูดซับ (g),  $w_0$  คือน้ำหนักเส้นใยนาโนคาร์บอนก่อนการทดสอบการดูดซับ (g) และ  $q$  คือ ประสิทธิภาพการดูดซับของเส้นใยนาโนคาร์บอน (%)

$$q = \frac{w-w_0}{w_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยทางผู้วิจัยได้เลือกขั้นตอนการทดสอบการดูดซับน้ำมันแบบสั้น (15 นาที) โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. เตรียมน้ำมันเครื่อง น้ำมันดิบ และน้ำมันที่ไม่ได้คุณภาพปริมาณ 10 มิลลิลิตรใส่ลงในปิ๊กเกอร์

2. นำดอกธูปฤๅษีและเส้นใยคาร์บอนน้ำหนัก 1 กรัม มาจุ่มลงในน้ำมันที่เตรียมไว้ เมื่อดอกธูปฤๅษี และเส้นใยคาร์บอนเกิดการดูดซับน้ำมันจนหมด ก็จะทำกรเพิ่มปริมาณน้ำมันให้มากขึ้นโดยเพิ่มทีละ 1 มิลลิลิตรไปเรื่อยๆ จนกว่าดอกธูปฤๅษี และเส้นใยคาร์บอนไม่เกิดการดูดซับน้ำมันแล้ว (เกิดความอึดตัวใน การดูดซับน้ำมัน) จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าดอกธูปฤๅษี และเส้นใยคาร์บอนดูดซับน้ำมัน เต็มประสิทธิภาพ

3. นำดอกรูปฤๅษีและเส้นใยคาร์บอนที่ดูดซับน้ำมันเป็นเวลา 15 นาที ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมัน (Oil Adsorption Capacity)

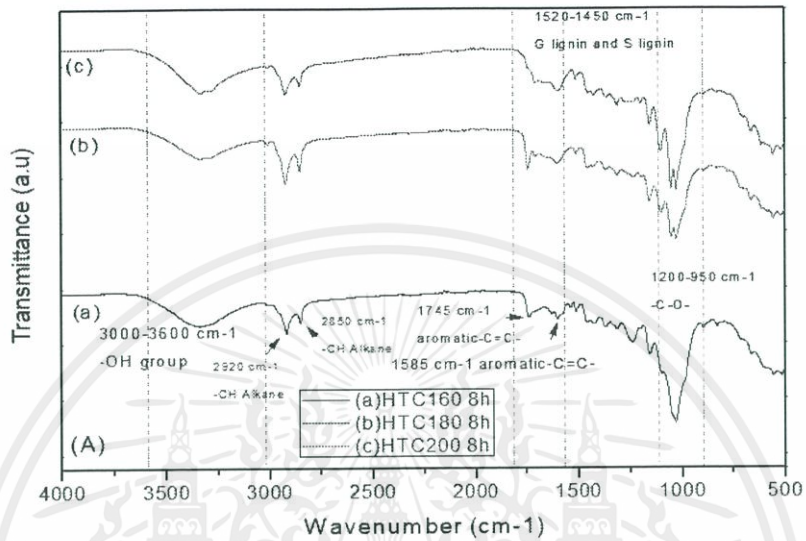
3.7.2 การทดสอบการดูดซับน้ำมันโดยที่น้ำมันลอยอยู่บนน้ำ

1. เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการดูดซับน้ำมัน
2. ชั่งดอกรูปฤๅษีและเส้นใยนาโนคาร์บอนจำนวน 1 กรัม
3. เติมน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้วลงในภาชนะสำหรับการทดสอบน้ำมัน โดยน้ำมันจะลอยอยู่บนน้ำ
4. นำดอกรูปฤๅษีและเส้นใยนาโนคาร์บอนจุ่มลงไปใ้ในภาชนะที่มีน้ำและน้ำมันเพื่อทำการดูดซับน้ำมัน
5. นำดอกรูปฤๅษีและเส้นใยนาโนคาร์บอนที่ผ่านการดูดซับน้ำมันแล้วออกจากภาชนะ สำหรับการทดสอบน้ำมัน
6. นำดอกรูปฤๅษีและเส้นใยคาร์บอนที่ดูดซับน้ำมันแล้ว ไปวัดค่าการดูดซับ

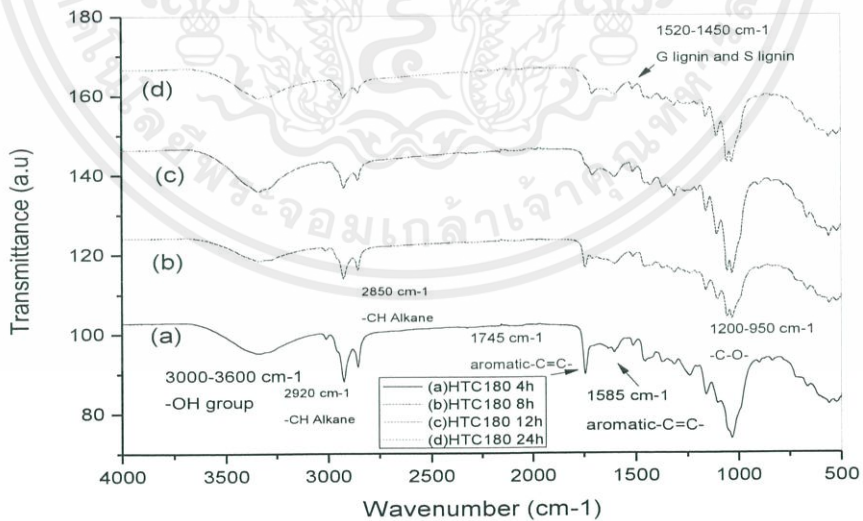
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล



รูปที่ 4.1 กราฟ FT-IR ของดอกรูปถาซีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (a) 160°C, (b) 180°C, และ (c) 200°C ที่เวลาเท่ากัน (8h)



รูปที่ 4.2 กราฟ FT-IR ของดอกรูปถาซีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เวลาแตกต่างกัน (a) 4h, (b) 8h, (c) 12h และ (d) 24h ที่อุณหภูมิ 180°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.1 และ 4.2 เป็นการแสดงผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันแสดงให้เห็นว่าเกิดพีค broad band ในช่วง  $3600-3000\text{ cm}^{-1}$  สามารถระบุได้ว่าเป็นหมู่ -OH stretching ในหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิล[58] พีคที่  $2925\text{ cm}^{-1}$  และ  $2850\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ C-H stretching ในพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส[59] พีคที่  $1740\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่เอสเทอร์ของเฮมิเซลลูโลสหรือคาร์บอกซิลิกของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส พีคที่  $1600\text{ cm}^{-1}$  และ  $1512\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ aromatic -C=C-stretching เป็น aromatic ring ของลิกนิน พีคที่  $1460\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ -CH<sub>2</sub>- bending พีคในช่วง  $1380-1240\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ G lignin และ S lignin และพีคในช่วง  $1200-950\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ -C-O จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลมากขึ้น หมู่ -OH stretching จะมีปริมาณลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลมากขึ้น หมู่ -OH บริเวณรอบนอกของตัวอย่างมีน้อย โมเลกุลของน้ำไปเกาะได้น้อย ปริมาณของหมู่ -OH จึงลดลง ส่งผลให้ความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำมันดีขึ้น และเมื่อน้ำดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันในอากาศที่อุณหภูมิ  $300-500^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวของดอกธูปฤาษีและดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ( $160, 180$  และ  $200^{\circ}\text{C}$ ) เป็นเวลา 8 h และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$

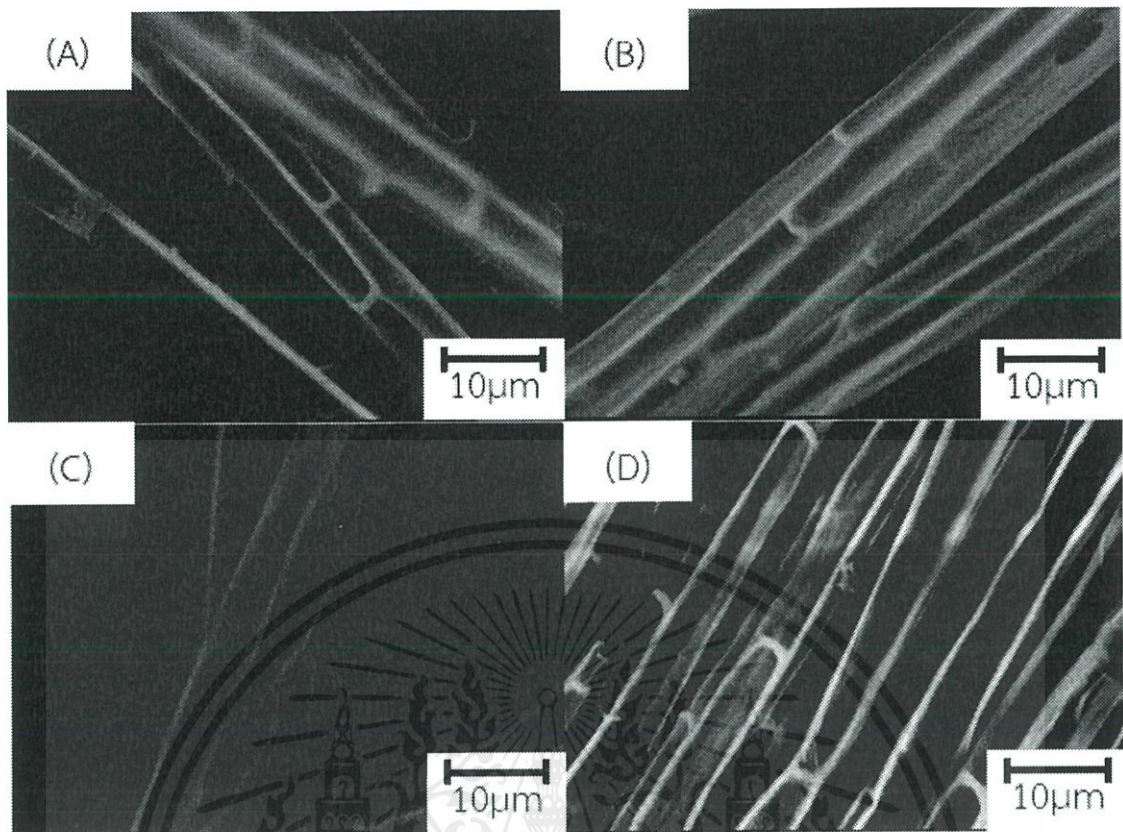
Parameter	$S_{\text{BET}}$ ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ )	Pore Volume ( $\text{cm}^3\text{g}^{-1}$ )	Pore Dimeter (nm)
Cattail Flowers	0	0.00046	90.15
$160^{\circ}\text{C}$	582	0.089	3.667
$180^{\circ}\text{C}$	586	0.099	3.653
$200^{\circ}\text{C}$	354	0.088	3.627

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เวลาแตกต่างกัน (4, 8, 12 และ 24h) ที่อุณหภูมิ 180°C และผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 900°C

Parameter time of hydrothermal	$S_{BET}$ ( $m^2g^{-1}$ )	Pore Volume ( $cm^3g^{-1}$ )	Pore Dimeter (nm)
4h	456	0.072	3.651
8h	586	0.099	3.653
12h	356	0.053	3.639
24h	407	0.010	3.694

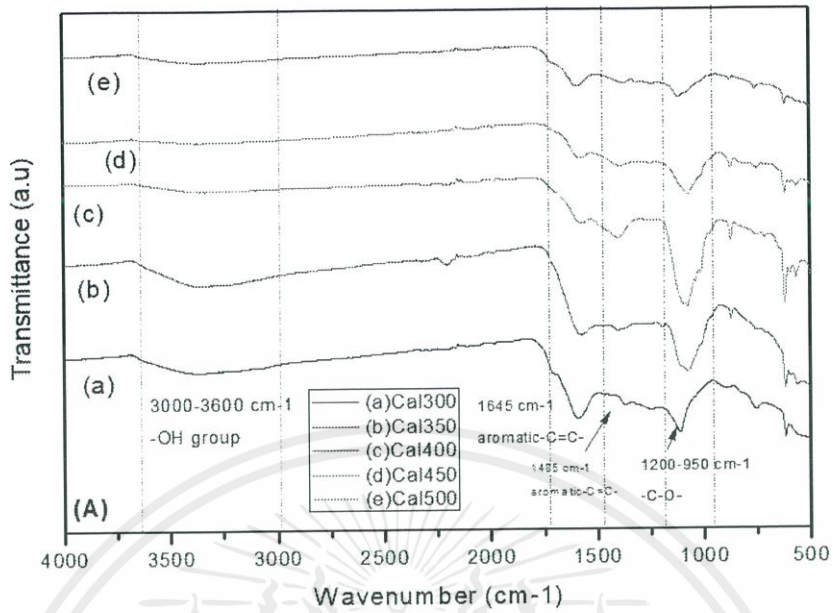
จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่าดอกธูปฤาษีที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆจะมีพื้นที่ผิวประมาณ  $0 m^2 g^{-1}$  แต่เมื่อนำดอกธูปฤาษีมาผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน (โดยไม่ได้ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล) จะมีพื้นที่ผิวประมาณ  $2 m^2 g^{-1}$  เปรียบเทียบกับดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลก่อนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันพบว่าค่าพื้นที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและเวลาในการทำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เพิ่มขึ้นจนถึง 180°C และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าค่าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปทำลายพันธะในดอกธูปฤาษีได้ แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิและเวลามากกว่า 180°C และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง เนื่องจากความร้อนของน้ำและระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ส่งผลให้น้ำสามารถเข้าไปทำลายพันธะในตัวดอกธูปได้มากกว่า และอาจเกิดจากการแตกหักทับซ้อนของปริมาตรรูพรุน ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าลดลง จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มัลสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนได้ โดยใช้อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันเพิ่มมากขึ้น



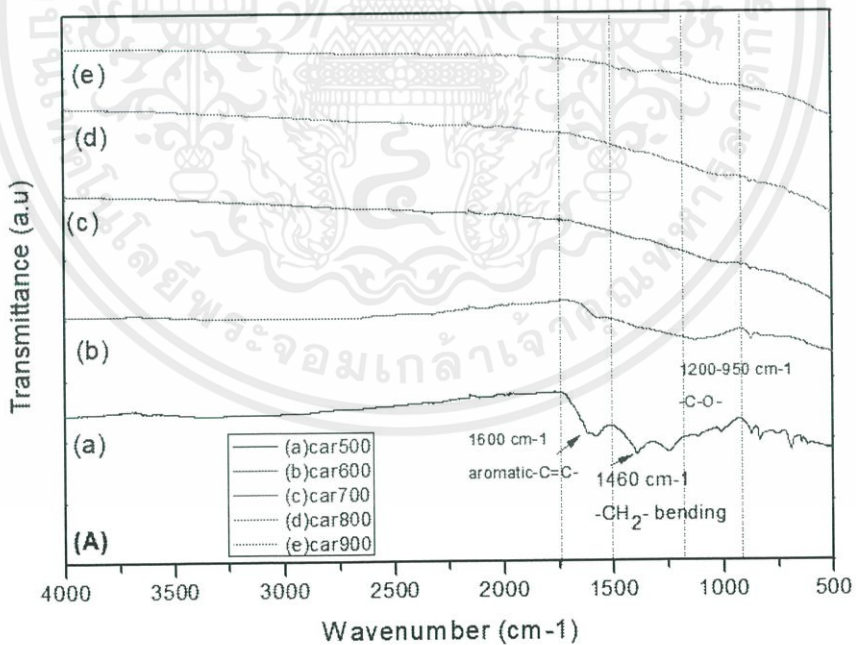
รูปที่ 4.3 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (A) Pure, (B) 160°C, (C) 180°C, (D) 200°C เป็นเวลา 8h

จากรูปที่ 4.3 เป็นภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกันเป็นเวลา 8 ชั่วโมงพบว่าดอกธูปฤาษีที่ไม่ได้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมีลักษณะของเส้นใยไม่แตกต่างจากดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 160 °C แต่พบว่าโครงสร้างของเส้นใยของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 180°C และ 200°C เห็นผนังเซลล์ชัดเจนมีรอยแตกเล็กน้อยพื้นผิวเรียบ และเส้นใยที่มีขนาดใหญ่จะเกิดการแตกหักออกเป็นร่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นและส่งผลต่อสมบัติไม่มีขั้วให้ดียิ่งขึ้น

## 4.2 ผลของอุณหภูมิของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน



รูปที่ 4.4 กราฟ FT-IR การทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันในอากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (a) 300°C, (b) 350°C, (c) 400°C, (d) 450°C และ (e) 500°C เป็นเวลา 2h



รูปที่ 4.5 กราฟ FT-IR การทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (a) 500°C, (b) 600°C, (c) 700°C, (d) 800°C และ (e) 900°C เป็นเวลา 2h

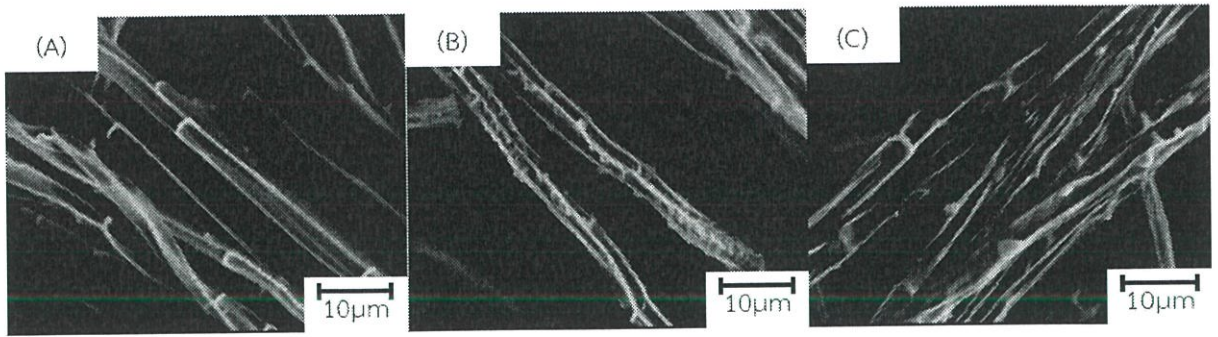
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.4 พบว่า ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันลดลงหมู่ฟังก์ชันหายไปแต่ยังเหลือหมู่ฟังก์ชันของ aromatic ring ของลิกนินและหมู่ -C-O และยังพบว่าเมื่อทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิมากกว่า 500 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะเป็นเถ้า และรูปที่ 4.5 ทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันในบรรยากาศ ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500-900°C พบว่าหมู่ฟังก์ชันหายไปมากกว่าผลของรูปที่ 4.4 ทั้งยังเหลือ ผลิตภัณฑ์มากกว่าอีกด้วยจึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์มีสมบัติเป็นคาร์บอนมากขึ้น ดอกธูปฤาษีจึงวิ่งเข้าหาน้ำมัน(สารประกอบไฮโดรคาร์บอน)ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนมากได้ง่าย และปริมาณคาร์บอนที่มากของ ดอกธูปฤาษี ทำให้ความไม่ชอบน้ำ หรือความไม่มีขี้มวลมากของดอกธูปฤาษีจึงจับตัวเข้าหากันในที่นี้คือน้ำมันซึ่งมีความไม่มีขี้เหมือนกัน ความสามารถในการดูดซับน้ำมันจึงมาก

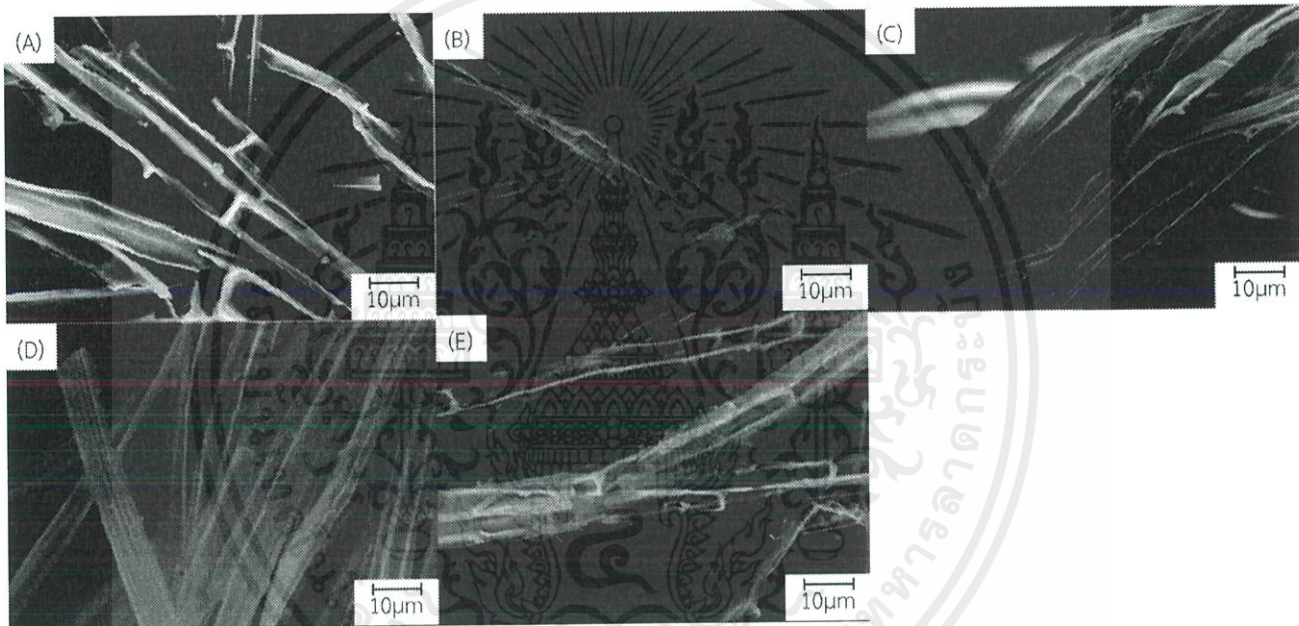
ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวของดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เงื่อนไขเดียวกัน (180°C 8h) และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (300, 500, 700 และ 900°C) เป็นเวลา 2 h

Parameter temperature of carbonization	$S_{BET}$ ( $m^2g^{-1}$ )	Pore Volume ( $cm^3g^{-1}$ )	Pore Dimeter (nm)
300°C	11.1	0.039	3.689
500°C	123	0.031	27.03
700°C	214	0.067	3.657
900°C	586	0.099	3.653

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้น ค่าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากความร้อนจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปทำลายพันธะในดอกธูปฤาษีได้ และในขณะเดียวกัน โครงสร้างของน้ำจะเข้าไปเพิ่มรูพรุนในดอกธูปฤาษี ส่งผลให้พื้นที่ผิวมากขึ้น ดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเงื่อนไขที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุด

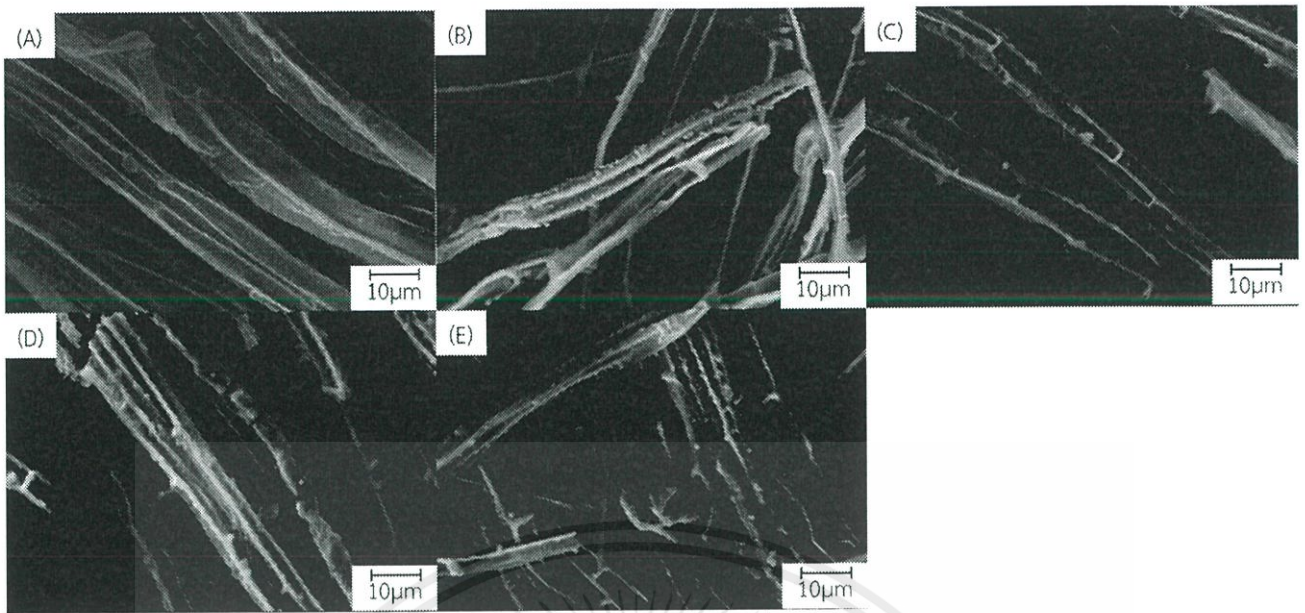


รูปที่ 4.6 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของดอกรูปกล้วยที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (A) 160°C, (B) 180°C และ (C) 200°C แต่ใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเท่ากัน 800°C 2h



รูปที่ 4.7 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของดอกรูปกล้วยที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันในอากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (A) 300°C, (B) 350°C, (C) 400°C, (D) 450°C และ (E) 500°C ใช้เวลา 2h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM (กำลังขยาย 1000X) ของดอกรูปภาซีที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (A) 500°C, (B) 600°C, (C) 700°C, (D) 800°C และ (E) 900°C ใช้เวลา 2h

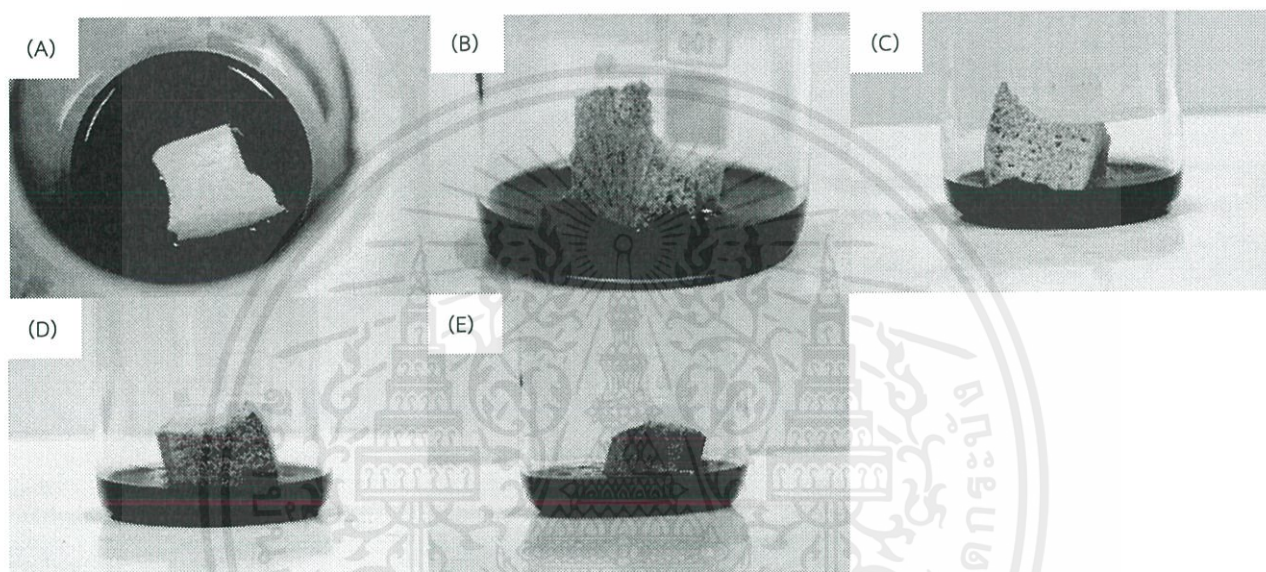
จากรูปที่ 4.7 เป็นภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของดอกรูปภาซีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิแตกต่างกันนำไปทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงพบว่าเมื่ออุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มขึ้นทำให้เกิดรูปร่างทรงกลม (Carbon sphere) บนพื้นผิวของเส้นใยคาร์บอนได้ง่ายมากขึ้นแต่มีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ [60-62] จากรูป 4.8 เป็นภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่าของดอกรูปภาซี แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันในอากาศที่เวลาเท่ากันพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเกิดรูปร่างทรงกลม (Carbon sphere) บนพื้นผิวของเส้นใยมากขึ้นโดยจะเห็นรูปร่างทรงกลม (Carbon sphere) ได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 500°C แต่เห็นไม่ชัดเจน และจากรูปที่ 4.8 เป็นภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่าของดอกรูปภาซีผ่านการคาร์บอนไนเซชันในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นจำนวนรูปร่างทรงกลม (Carbon sphere) จะเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้น โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดรูปร่างทรงกลม (Carbon sphere) ดีที่สุดคือ 900°C จากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่าที่เปรียบเทียบอุณหภูมิและเวลา สรุปว่าอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มมากขึ้นของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชันส่งผลต่อพื้นผิวโครงสร้างของเส้นใยทำให้พื้นผิวขรุขระเกิดรอยแตกเป็นร่องช่วยเพิ่มที่ผิวเพิ่มนำไปทำการคาร์บอนไนเซชันทำให้เกิดปฏิกิริยาง่ายขึ้น เพราะมีพื้นผิวมากที่ส่งผลต่อการเพิ่มของรูปร่างทรงกลม (Carbon sphere) ที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซับดูดน้ำมัน [72]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

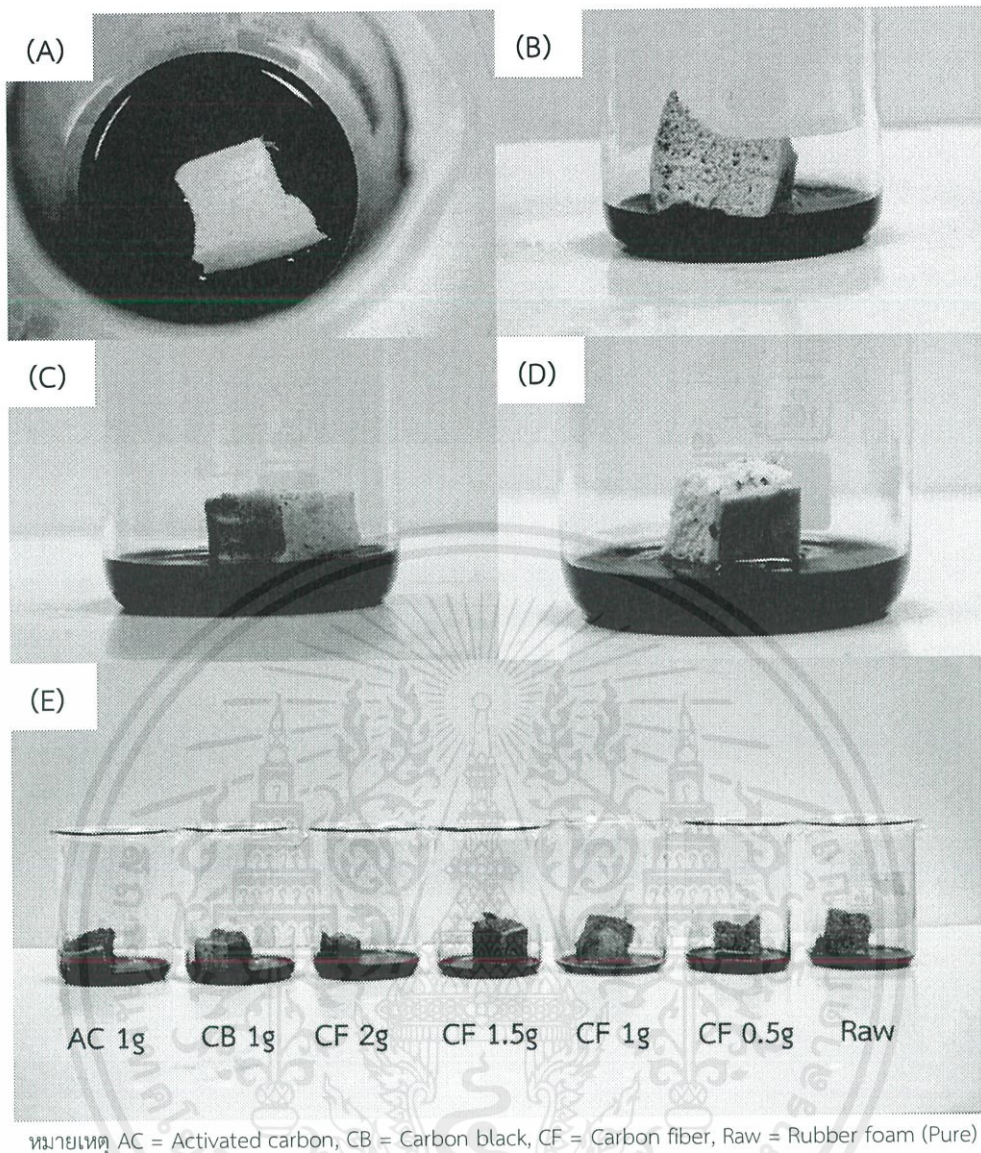
### 4.3 การทดสอบการดูดซับน้ำมัน

ในกรณีนี้จะศึกษาผลของคาร์บอน 3 ชนิด ในการขึ้นรูปเป็นโพลีเมอร์ดูดซับน้ำมัน โดยนำโพลีเมอร์ที่ผสม Carbon Fiber, Carbon Black และ Activated Carbon ในอัตราส่วนที่แตกต่าง แล้วนำมาดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) การทดสอบการดูดซับน้ำมันจะแสดงดังรูป

#### 4.3.1 การทดสอบการดูดซับน้ำมันบนพื้นผิวปกติตามมาตรฐาน ASTM F 726-06



รูปที่ 4.9 ภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) (ตามมาตรฐาน ASTM F 726-06) ของโพลีเมอร์ (A) โพลีเมอร์ที่ยังไม่ผ่านการเติม Carbon Fiber, (B) โพลีเมอร์ที่เติม Carbon Fiber 0.5 g, (C) โพลีเมอร์ที่เติม Carbon Fiber 1 g, (D) โพลีเมอร์ที่เติม Carbon Fiber 1.5 g และ (E) โพลีเมอร์ที่เติม Carbon Fiber 2 g



รูปที่ 4.10 ภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) (ตามมาตรฐาน ASTM F 726-06) ของโฟมยางพารา (A) โฟมยางพาราที่ยังไม่ผ่านการเติม Carbon Fiber, (B) โฟมยางพาราที่เติม Carbon Fiber , (C) โฟมยางพาราที่เติม Carbon Black (D) โฟมยางพาราที่เติม Activated Carbon จำนวน 1 g และ (E) หลังจากทดสอบการดูดซับเป็นเวลา 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

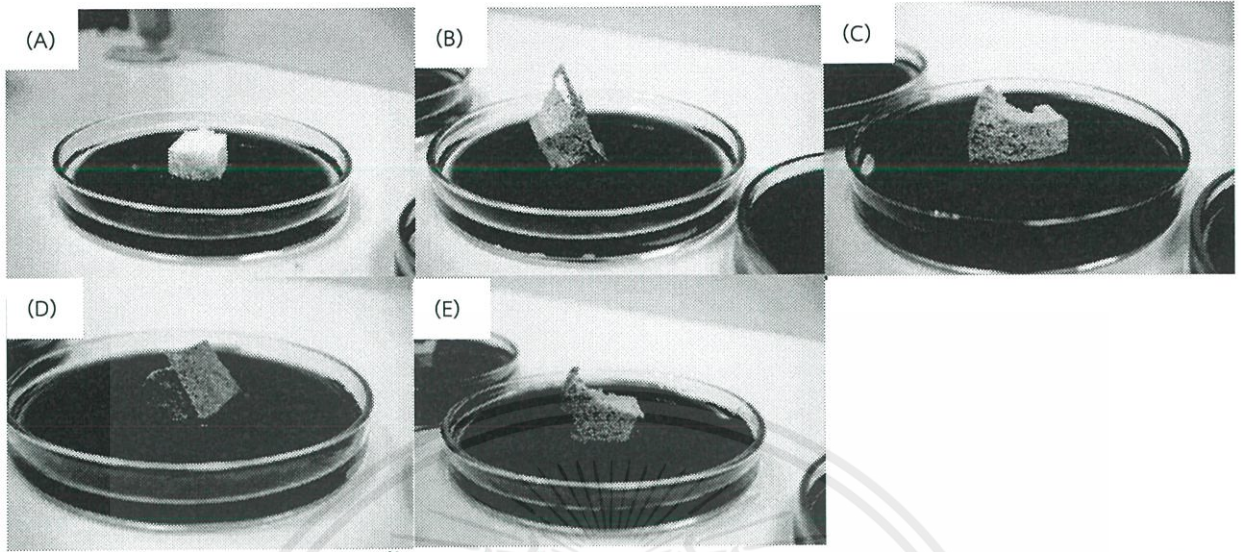
ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วของโฟมยางพาราชนิดต่างๆ ที่เงื่อนไขการดูดซับบนพื้นผิวปกติ

Parameter	Adsorption capacity (%)	S.D.
Natural Rubber foam	468	9.71
Rubber foam + Carbon fiber 0.5g	299	19.78
Rubber foam + Carbon fiber 1g	669	9.53
Rubber foam + Carbon fiber 1.5g	524	12.15
Rubber foam + Carbon fiber 2g	192	13.90
Rubber foam + Carbon black 1g	401	8.53
Rubber foam + Activated carbon 1g	364	33.14

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของการดูดซับน้ำมันเครื่องจากโฟมยางพาราที่มีปริมาณ Carbon Fiber ที่แตกต่างกันคือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัม จากรูปเมื่อมองด้วยพบว่าตาเปล่าโฟมยางพาราที่เติม Carbon Fiber ลงไป 1 กรัม สามารถดูดซับน้ำมันได้มากที่สุดหลังจากเวลาผ่านไป 15 นาที และในตารางที่ 4.4 แสดงค่าการดูดซับของโฟมยางพาราที่เติม Carbon Fiber ลงไป 1 กรัม มีค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องประมาณ 6.7 เท่าของน้ำหนักโฟมยางพาราเนื่องจากอัตราส่วนของ Carbon Fiber ที่เป็นสารตัวเติม เพื่อให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้นอีกทั้ง Carbon Fiber มีโครงสร้างเป็นเส้นใยจะช่วยให้โครงสร้างของโฟมยางพาราให้แข็งแรงขึ้นและช่วยเพิ่มความเร็วในการวัลคาไนเซชันให้เร็วยิ่งขึ้นส่วนโฟมยางพาราที่เติม Carbon Fiber ลงไป ในอัตราส่วน 0.5, 1.5 และ 2 กรัม ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องไม่ดีเนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมเพราะถ้าเติมลงไปน้อยจะทำให้คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำน้อยทำให้ดูดซับได้ไม่มากแต่ถ้าเติม Carbon Fiber ลงไปมากเกินไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

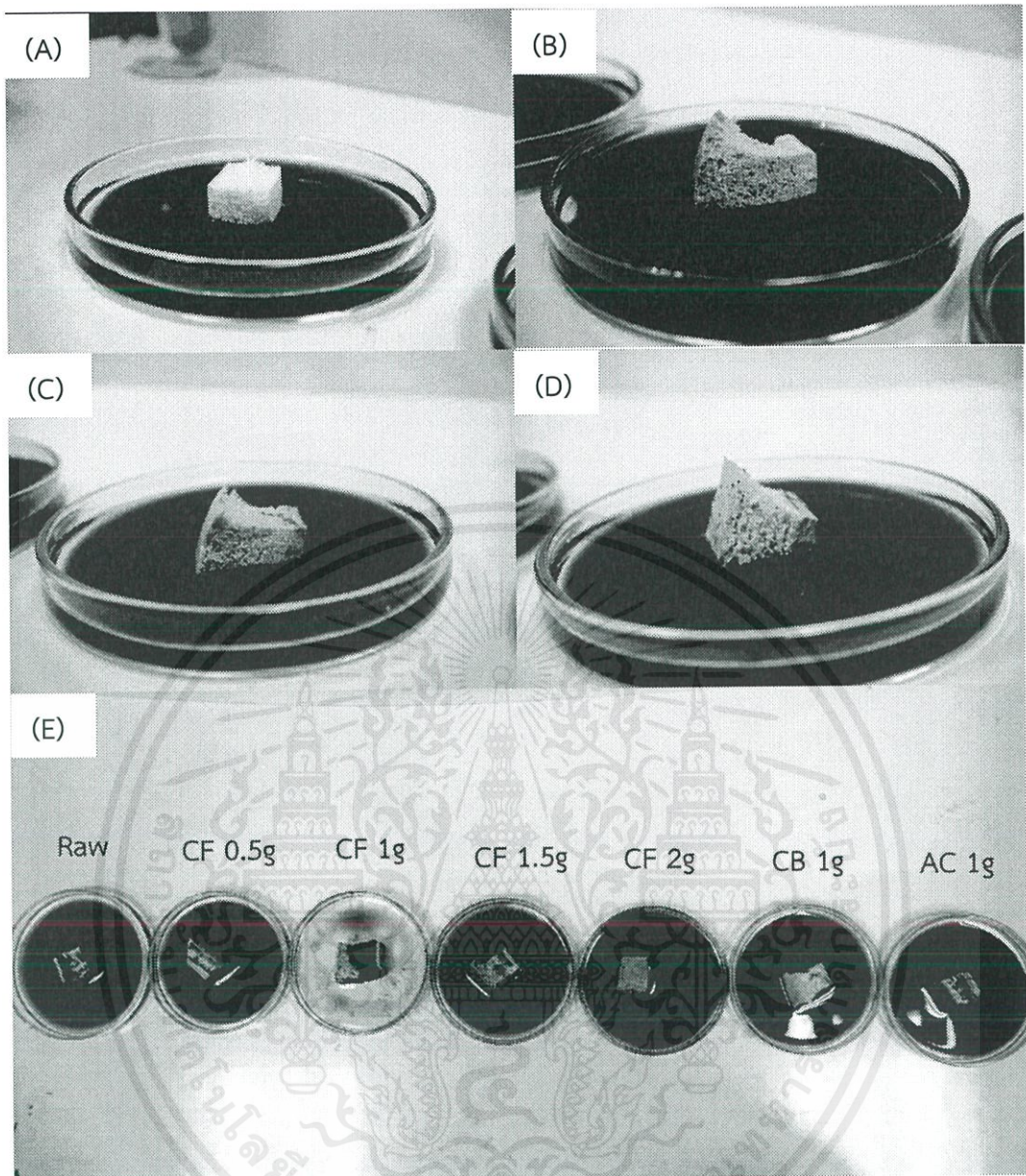
จะทำให้การการวัลคาไนเซชันให้เร็วเกินไป ทำให้โครงสร้างเกิดการจับตัวกันเร็วมากเกินไปทำให้เกิด  
 ภาวะยางตายซึ่งทำให้โพลียาพาราจะมีลักษณะโครงสร้างพังทลายและไม่นุ่มฟูเป็นผลให้  
 ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องต่ำ ภาพที่ 4.10 แสดงการดูดซับน้ำมันเครื่องของโพลียาพาราที่  
 ไม่เติม Carbon ลงไปและโพลียาพาราที่เติมชนิด Carbon แตกต่างกันคือ Carbon Fiber, Carbon  
 Black และ Activated Carbon พบว่าโพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber ลงไปมีประสิทธิภาพการ  
 ดูดซับที่ดีที่สุดหลังจากเวลาผ่านไป 15 นาที เมื่อมองจากตาเปล่าและจากตารางที่ 4.4 แสดงค่าการ  
 ดูดซับของโพลียาพาราที่ไม่เติม Carbon มีค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องประมาณ 4.6 เท่าของน้ำหนัก  
 โพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber มีค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องประมาณ 6.7 เท่าของน้ำหนักโพลี  
 ยาพาราเนื่องจาก Carbon Fiber มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (ไม่มีขั้ว) และส่วนประกอบส่วนใหญ่  
 ในน้ำยาพาราเป็นไฮโดรคาร์บอน (ไม่มีขั้ว) ทำให้ Carbon Fiber ที่เติมลงไปละลายเป็นเนื้อเดียวกับ  
 ยาง ส่วนยางพาราที่เติม Carbon Black และ Activated Carbon มีประสิทธิภาพการดูดซับ  
 ใกล้เคียงกันคือ 4 และ 3.6 เท่าของน้ำหนักตามลำดับ แต่ต่ำกว่า Carbon Fiber เพราะ Carbon  
 Black และ Activated Carbon ไม่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำและไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ  
 ยาพาราประกอบด้วยคุณสมบัติของ Carbon Black จะเน้นไปที่การเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ และ  
 Activated Carbon จะมีคุณสมบัติพื้นที่ผิวที่มากซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในการ  
 ดูดซับน้ำมันเครื่องจึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่ำกว่าโพลียาพาราที่เติม Carbon Fiber

#### 4.3.2 การทดสอบการดูดซับน้ำมันโดยที่น้ำมันลอยอยู่บนน้ำ



รูปที่ 4.11 ภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้งานแล้ว (Used motor oil) (ตามมาตรฐาน ASTM F 726-06) ของโพลียเอทิลีนที่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ (A) โพลียเอทิลีนที่ยังไม่ผ่านการเติม Carbon Fiber, (B) โพลียเอทิลีนที่เติม Carbon Fiber 0.5 g, (C) โพลียเอทิลีนที่เติม Carbon Fiber 1 g, (D) โพลียเอทิลีนที่เติม Carbon Fiber 1.5 g และ (E) โพลียเอทิลีนที่เติม Carbon Fiber 2 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้จนแล้ว (Used motor oil) (ตามมาตรฐาน ASTM F 726-06) ของโพลียากราฟ (A) โพลียากราฟที่ยังไม่ผ่านการเติม Carbon Fiber, (B) โพลียากราฟที่เติม Carbon Fiber , (C) โพลียากราฟที่เติม Carbon Black (D) โพลียากราฟที่เติม Activated Carbon เป็นจำนวน 1 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วของโฟมยางพาราชนิดต่างๆ ที่เงื่อนไขการดูดซับบนพื้นผิวน้ำ

Parameter	Adsorption capacity (%)	S.D.
Natural Rubber foam	443	32.58
Rubber foam + Carbon fiber 0.5g	204	8.29
Rubber foam + Carbon fiber 1g	595	2.73
Rubber foam + Carbon fiber 1.5g	422	9.46
Rubber foam + Carbon fiber 2g	103	6.11
Rubber foam + Carbon black 1g	337	10.29
Rubber foam + Activated carbon 1g	383	19.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนโฟมดูดซับน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้น (Contact angle)

Parameter	Contact angle (°)	S.D.
Natural Rubber foam	86	16.32
Rubber foam + Carbon fiber 1g	112	5.88
Rubber foam + Carbon fiber 1.5g	103	9.83
Rubber foam + Carbon black 1g	105	20.11
Rubber foam + Activated carbon 1g	98	15.25

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลของการดูดซับน้ำมันเครื่องบนผิวหน้าของโฟมยางพาราที่มีปริมาณ Carbon Fiber ที่แตกต่างกันคือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัม จากรูปเมื่อมองด้วยพบว่าตาเปล่าโฟมยางพาราที่เติม Carbon Fiber ลงไป 1 กรัม สามารถดูดซับน้ำมันได้มากที่สุดหลังจากเวลาผ่านไป 15 นาที และในตารางที่ 4.5 แสดงค่าการดูดซับของโฟมยางพาราที่เติม Carbon Fiber ลงไป 1 กรัมมีค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องประมาณ 5.9 เท่าของน้ำหนักโฟมยางพาราเนื่องจากอัตราส่วนของ Carbon Fiber ที่เป็นสารตัวเติม เพื่อให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้นอีกทั้ง Carbon Fiber มีโครงสร้างเป็นเส้นใยจะช่วยให้จับโครงสร้างของโฟมยางพาราให้แข็งแรงขึ้นและช่วยเพิ่มความเร็วในการวัลคาไนเซชันให้เร็วยิ่งขึ้นเมื่อนำไปดูดซับบนน้ำทำให้สามารถดูดซับส่วนที่เป็นน้ำมันเครื่องได้มากกว่าดูดซับน้ำ ส่วนโฟมยางพาราที่เติม Carbon Fiber ลงไป ในอัตราส่วน 0.5, 1.5 และ 2 กรัม ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องบนผิวหน้าไม่ดี เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสม เพราะถ้าเติมลงไปน้อยจะทำให้คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำน้อย ทำให้ดูดซับได้ไม่มาก แต่ถ้าเติม Carbon Fiber ลงไปมากเกินไปจะทำให้การการวัลคาไนเซชันให้เร็วเกินไปทำให้โครงสร้างเกิดการจับตัวกันเร็วมากเกินไปทำให้เกิดภาวะตายซึ่งทำให้โฟมยางพาราจะมีลักษณะโครงสร้างพังทลายและไม่นุ่มฟูเป็นผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องต่ำ รูปที่ 4. แสดงการดูดซับน้ำมันเครื่องของโฟมยางพาราบนผิวหน้าที่ไม่เติม Carbon ลงไปและโฟมยางพาราที่เติมชนิด Carbon แตกต่างกันคือ Carbon Fiber, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Carbon Black และ Activated Carbon พบว่าโพลียเอทิลีนที่เติม Carbon Fiber ลงไปมีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุดหลังจากเวลาผ่านไป 15 นาที เมื่อมองจากตาเปล่าและจากตารางที่ 4.5 แสดงค่าการดูดซับของโพลียเอทิลีนที่เติม Carbon Fiber มีค่าการดูดซับน้ำมันเครื่องประมาณ 5.9 เท่าของน้ำหนักโพลียเอทิลีนเนื่องจาก Carbon Fiber มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (ไม่มีขี้) และส่วนประกอบส่วนใหญ่ในน้ำยาล้างเป็นไฮโดรคาร์บอน (ไม่มีขี้) ทำให้ Carbon Fiber ที่เติมลงไปละลายเป็นเนื้อเดียวกับยาง ส่วนยาล้างที่เติม Carbon Black และ Activated Carbon มีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกันคือ 3.3 และ 3.8 เท่าของน้ำหนักตามลำดับ แต่ต่ำกว่า Carbon Fiber เพราะ Carbon Black และ Activated Carbon ไม่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำและไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำยาล้างประกอบกับคุณสมบัติของ Carbon Black จะเน้นไปที่การเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ และ Activated Carbon จะมีคุณสมบัติพื้นที่ผิวที่มากซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในการดูดซับน้ำมันเครื่องจึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่ำกว่าโพลียเอทิลีนที่เติม Carbon Fiber



## สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่ามีการดูดซับน้ำมันได้ดีที่สุด เนื่องจากเมื่อดอกธูปฤาษีผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้ว ทำให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น มีความเป็นคาร์บอนมากขึ้น น้ำมันจึงถูกดูดซับโดยดอกธูปฤาษี ซึ่งมีความไม่ขี้และไม่แข็งและมอดคล้องกับค่าการดูดซับน้ำมันมากขึ้น (สารประกอบไฮโดรคาร์บอน) ส่งผลให้เกิดการดูดซับ อีกทั้งพื้นที่ผิวสัมผัสและความเป็นรูพรุนที่มากขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันมากกว่าดอกธูปปกติ ซึ่งกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของดอกธูปฤาษีให้มีความไม่ชอบน้ำ และมีความเป็นคาร์บอนมากขึ้น โดยจะให้ น้ำ ( $H_2O$ ) และความร้อน เข้าไปทำลายพันธะ (Break bond) ของลิกนิน, เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนประกอบในดอกธูปฤาษี ทำให้มีความเป็นคาร์บอนและความไม่ขี้มากขึ้น และในขณะเดียวกันโครงสร้างน้ำจะเข้าไปเปิดรูพรุน (Pore) ในดอกธูปฤาษี ทำให้พื้นที่ผิว (Surface area) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดอกธูปปกติ จึงทำให้ดอกธูปฤาษีที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจับตัวกับน้ำมันได้ดีกว่าดอกธูปปกติ ส่งผลให้มีการดูดซับน้ำมันได้ดีกว่า สรุปได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในการทำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะส่งผลต่อความเป็นคาร์บอน, ความไม่ขี้ (ไม่ชอบน้ำ) และพื้นที่ผิวหรือความเป็นรูพรุนของดอกธูปฤาษีที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมัน และเมื่อนำเส้นใยคาร์บอน, คาร์บอนแบล็ค และแอคทิเวตเต็ดคาร์บอนมาผสมในโพลีเมียงพาราแล้วขึ้นรูป พบว่าโพลีเมียงพาราที่ผสมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 กรัม มีรูปร่างลักษณะคล้ายฟองน้ำ มีคุณสมบัติไฮโดรโฟบิกที่ดี ทดสอบโดยวิธี contact angle มีมุมสัมผัสเฉลี่ยสูงถึง  $112^\circ$  นอกจากนี้เมื่อนำไปทดสอบการดูดซับน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้ว มีค่าการดูดซับ 6.7 และ 5.9 เท่าโดยน้ำหนัก ในพื้นผิวปกติและบนผิวน้ำตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนที่เติมลงไป ช่วยเพิ่มคุณสมบัติไฮโดรโฟบิก (ความไม่ชอบน้ำ) ทำให้โพลีเมียงพาราดูดซับน้ำมันได้ดียิ่งขึ้น

## 5.2 แนวทางการพัฒนา

ควรรศึกษามลของการดูดซับน้ำมันและสารเคมีของปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่ผสมในโพลีเมอร์ เนื่องจาก การเติมวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced) ซึ่งจะส่งผลต่อรูปร่างของโพลีเมอร์ เป็นรูพรุน และการขึ้นรูปโพลีเมอร์ในเฟสแรกๆ ที่เรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของโพลีเมอร์ อาจจะใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติไฮโดรโฟบิกชนิดอื่นๆ เป็นส่วนประกอบใน Reinforcement phase และควรรศึกษาอัตราส่วนสูตรสารเคมีในการขึ้นรูปโพลีเมอร์ เพื่อให้ได้โพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ลักษณะเหมือนฟองน้ำมันมากขึ้น และอีกแนวทางการพัฒนาคือ ควรรจะทดสอบน้ำมันชนิดอื่นๆ และสารเคมีเพิ่มเติม เนื่องจากน้ำมันทุกชนิดมีส่วนประกอบที่ไม่เหมือนกัน ส่งผลให้เส้นใยนาโนคาร์บอนเกิดการดูดซับในปริมาณที่แตกต่างกัน



## บรรณานุกรม

- [1] บุญรอด วงษ์สวาท. “น้ำมันดิบของบริษัท ปตท.รั่วไหล ทำเกาะเสม็ดพินาศ.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.manager.co.th/daily>. 2557.
- [2] พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล. 2556. ภาพรวมแนวทางการจัดการน้ำมันรั่วไหล (Oil Spill) ลงสู่ทะเล. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] ราชศักดิ์ นิลศิริ. “เหตุเกิด ณ อ่าวพร้าว.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.ngthai.com>. 2557.
- [4] นำชัย ชีววิวรรณ. สาระวิทย์ ย่อยโลกข้อมูลข่าวสารวิทยาศาสตร์เพื่อคุณ กรณีน้ำมันดิบรั่วสู่ท้องทะเล. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ฉบับที่ 5 สิงหาคม 2556; ISSN 2286-9298
- [5] Consumer News and Business Channel. “17 Ways To Clean Up The Gulf Oil Spill”. (ดร.นำชัย ชีววิวรรณ). [Online]. เข้าถึงได้จาก: [www.cnbc.com](http://www.cnbc.com) [29 ก.ย. 2014]
- [6] บรรจง วรธนพงษ์ และเอนก ก้านสังวร. 2537. “ระบบบำบัดน้ำเสีย,” ในเอกสารประกอบการบรรยายใน การประชุมเชิงปฏิบัติการโครงการศึกษาและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากโครงการพระราชดำริ โรงแรมชะอำ จังหวัดเพชรบุรี วันที่ 3-4 เมษายน 2537. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [7] Rotwiroon, Paritta, “Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Run Off by Natural Fibers”, Master’s thesis, Chulalongkorn University, 2004.
- [8] P..J.M. Sale, R.G. Wetzel, “Growth and metabolism of Typha species in relation to cutting treatments”, Aquatic Botany, vol. 15, pp. 321-334, 1983.
- [9] J.P. Ball, “Influence of subsequent flooding depth on cattail control by burning and mowing”, Journal of Aquatic Plant Management, vol. 28, pp. 32-36, 1990.
- [10] Barry Arkles, “Hydrophobicity, Hydrophilicity and Silanes, Paint & Coatings Industry Magazine”, pp. 105, 1992.
- [11] C. Belver, M.A.B Munoz, M.A. Vicente, “Chemical activation of a kaolinite under acid and alkaline conditions”, Chem. Mater, vol. 14, pp. 2033–2043, 2002.
- [12] J. A Libra , K. S Ro , C. Kammann , A. Funke , N. D Berge , Y. Neubauer , M-M. Titirici , C. Fühner , O. Bens , J. Kern and K-H. Emmerich, “Hydrothermal carbonization เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis”, *Biofuels*, vol. 2, pp. 89-124, 2011.

[13] M. Sevilla, J.A. Maciá-Agulló, AB. Fuertes, “Hydrothermal carbonization of biomass as a route for the sequestration of CO<sub>2</sub>: chemical and structural properties of the carbonized products”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, pp. 3152-3159, 2011.

[14] S. Irmak, M. Kurtuluş, A. Hasanoğlu (Hesenov), O. Erbatur, “Gasification efficiencies of cellulose, hemicellulose and lignin fractions of biomass in aqueous media by using Pt on activated carbon catalyst”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 49, pp. 102-108, 2013.

[15] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. “ดอกตันรูปถั่วเขียวพีชกำจัดคราบน้ำมัน” [Online] เข้าถึงได้จาก: <http://teen.mthai.com>. 2556.

[16] สำนักงานหอพรรณไม้ สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. สารานุกรมพืช, “ธูปถั่วเขียว”. [Online]. เข้าถึงได้จาก: [web3.dnp.go.th](http://web3.dnp.go.th). [6 ส.ค. 2014].

[17] ฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. “ธูปถั่วเขียว”. (นพพล เกตุประสาท หน่วยอนุรักษ์และใช้ประโยชน์พืชพรรณ). [Online]. เข้าถึงได้จาก: [clgc.rdi.ku.ac.th](http://clgc.rdi.ku.ac.th). [6 ส.ค. 2014].

[18] ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. “การผลิตกระดาษจากธูปถั่วเขียวและผักตบชวา”. (นพ พล เกตุประสาท หน่วยอนุรักษ์และใช้ประโยชน์พืชพรรณ). [Online]. เข้าถึงได้จาก: [www.nectec.or.th](http://www.nectec.or.th). [6 ส.ค. 2014].

[19] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. “ดอกตันรูปถั่วเขียวพีชกำจัดคราบน้ำมัน”. (ศาสตราจารย์ จิติ หนูแก้ว). [Online]. เข้าถึงได้จาก: [www.nano.kmitl.ac.th](http://www.nano.kmitl.ac.th). [6 ส.ค. 2014].

[20] ระบบฐานข้อมูลองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี ดาราศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ศูนย์วิทยาศาสตร์เพื่อ การศึกษา. “ต้นธูปถั่วเขียว”. [Online]. เข้าถึงได้จาก: [www.nano.kmitl.ac.th](http://www.nano.kmitl.ac.th). [6 ส.ค. 2014].

[21] Ms. Pornphin Boonpan. “น้ำยาฟารา เป็นสิ่งมหัศจรรย์” [Online]. Available from Internet : [www.gotoknow.org](http://www.gotoknow.org). 2562

[22] science-news. “ย า ง ธิ ร ร ม ช า ติ ” [Online]. Available from Internet : <http://www.electron.rmutphysics.com>. 2562.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. "กลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตยาง" [Online]. Available from Internet. [www.smi.or.th](http://www.smi.or.th) 2562.
- [24] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง. "ผลิตภัณฑ์โพลียาง" [Online]. Available from Internet : <http://mahidolrubber.org>. 2562.
- [25] สถาบันพลาสติก. "เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์" [Online]. Available from Internet : <http://rubber.oie.go.th>. 2562.
- [26] M. Asifa, T. Muneer, "Renewable and Sustainable Energy Reviews", Energy supply, its demand and security issue for developed and emerging economics, vol. 11, pp. 1388-1413, 2007.
- [27] T. Ogi. Biomass Handbook. (2002) Japan Institute of Ed. Ohm-sha. pp. 12-15.
- [28] T.P. Fellingner. Hydrothermal and Ionothermal Carbon Structures: From carbon negative materials to energy applications. (2011) Institutional Repository of the University of Potsdam.
- [29] R. Demir-Cakan, N. Baccile, M. Antonietti, and M.M. Titirici, "Carboxylate-Rich Carbonaceous Materials via One-Step Hydrothermal Carbonization of Glucose in the Presence of Acrylic Acid", Chem. Mater, vol. 21, pp. 484-490, 2009.
- [30] M. Miura, H. Kaga, A. Sakurai, K. Takahashi, "Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating", Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 71, pp. 187-199, 2004.
- [31] A. V. Bridgwater, S. A. Bridge, "Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization", Elsevier Applied Science, pp. 2, 1991.
- [32] J. Lede, "Reaction temperature of solid particles undergoing an endothermal volatilization. Application to the fast pyrolysis of biomass", Biomass Bioenergy, vol. 7, pp. 49-60, 1994.
- [33] S. S. Sofer, O. R. Zaborsky, "Biomass Conversion processes for Energy and Fuels", pp. 201211, 1981.
- [34] T. Suzuki, M. Miyamoto, W.M. Luo, T. Yamada, T. Yoshida, "Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion", vol. 2, pp. 1580-1591, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [35] B. Viswanathan, P. Indra Neel and T. K. Varadarajan. Methods of Activation and Specific Applications of Carbon Materials (2009) National centre for catalysis research department of chemistry indian institute of technology madras Chennai, India.
- [36] J.I. Hayashi, A. Kazehaya , K. Muroyama , A.P. Watkinson, “Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation”, Carbon, vol. 38, pp. 1873–1878, 2000.
- [37] G. Q. Lu and X.S. Zhao, Nanoporous materials: an overview. (2004) Nanoporous Materials: Science and Engineering, Imperial College Press.
- [38] อติศักดิ์ ไสยสุข. วัสดุที่มีรูพรุนแบบลำดับชั้น: ความสำคัญและประโยชน์. เชียงใหม่. สำนักพิมพ์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2557. หน้า 58
- [39] B. Zoua, Y. Hua, F. Cui, L. Jiang, D. Yu, H. Huang, “Effect of surface modification of low cost mesoporous SiO<sub>2</sub> carriers on the properties of immobilized lipas”, J. Coll. Inter. Sci, vol. 417, pp. 210-216, 2014.
- [40] S. Mitchell, J. Pérez-Ramírez, “Mesoporous zeolites as enzyme carriers: Synthesis, characterization, and application in biocatalysis”, Cat. Today, vol. 168, pp.28-37, 2011.
- [41] E.C. Peters, F. Svec and Jean M.J. Frechet, “Rigid macroporous polymer monoliths”, Adv. Mater, vol. 14, pp. 1169-1181, 1999.
- [42] Z. Yuan, B. Su, “Insight into hierarchically meso-macroporous structured materials”, J. Mat. Chem, vol. 16, pp. 663-677, 2006.
- [43] G. Centi, S. Perathoner, “Novel catalyst design for multiplephase reaction”, Cat. Today, vol. 79-80, pp. 3-13, 2003.
- [44] Hoa Andy. “Adsorption Isotherm.” [Online]. Available from Internet : <http://particlesciences.blogspot.com>. 2013.
- [45] นิสิตระดับปริญญาโท – เอก สาขาการวิจัยและการจัดการระบบสุขภาพ รุ่นที่ 5. 2556. การรับรู้ผลกระทบ และการจัดการวิกฤติน้ำมันรั่วบริเวณอ่าวพร้าว เกาะเสม็ด จังหวัดระยอง. ปริญญาโท-เอก คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [46] คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. “น้ำมันรั่วที่เกาะเสม็ด มีผลกระทบต่ออย่างไรบ้าง”. (ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ธรรณ อารังนาวาสวัสดิ์). [Online]. เข้าถึงได้จาก: [www.oknation.com](http://www.oknation.com) [27 ต.ค. 2014]
- [47] กรมควบคุมมลพิษ. โครงการการจัดทำคู่มือการประเมินความเสียหายจากระบบนิเวศและทะเลจากน้ำมัน รั่วไหล. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.marinepcd.org> [27 ต.ค. 2014]
- [48] Dilek Angin.” Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake”, vol. 128,pp. 593-597, 2013
- [49] สืบศิริ แซ่ลี และศักดิ์ชาย ลิกขา. “กระบวนการผลิตและสมบัติของแผ่นผ้าและผนังฉนวนกันความร้อนจากพืชในเขตพื้นที่ประเทศไทย” , มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2555
- [50] จิติ หนูแก้ว. “โครงสร้างของดอกต้นรูปูปลาซี” , วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2556
- [51] Yuan-Qing Li.” Carbon Aerogel from Winter Melon for Highly Efficient and Recyclable Oils and Organic Solvents Absorption”, 1492-1497,(2014).
- [52] Zhen-Yu. “Carbon nanofiber aerogels for emergent cleanup of oil spillage and chemical leakage under harsh conditions”, Sci. 4, (2014).
- [53] วีรยา วรคันธ์, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา. (2553). “การเสริมแรงของสารประกอบยางธรรมชาติด้วยซิลิกาผสมระหว่างเถ้าลอย และพรีซิพิเทตซิลิกา”. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [54] ดริญญา มูลชัย, เกียรติภูมิ นามวิเศษ, ครรชิต ดุมา. (2559). อิทธิพลของสารก่อกองต่อสมบัติของโฟมยางธรรมชาติที่ใส่ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติม. วิศวกรรมอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- [55] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. หน้า 221-228. 2543.
- [56] แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. ชวนพิมพ์. 2539. หน้า 108192.
- [57] สุพะไชย์ จินดาวงศ์กุล. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. สำนักพิมพ์วารสารกรม วิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 60 ฉบับที่ 189.
- [58] Gas sorption-principles of operation. 2 5 4 4 . [Online] [cite dated April 2 0 1 4 ] Available from Internet : <http://www.quantachrome.com/GasSorptio/index.htm>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[59] Lowel, S.L and Shields, Joan E, Powder surface area and porosity. 3 rd. ed, London: Chapman & Hall, pp. 1-40, 1991.

[60] หัสวีภา หมายมัน. “Scaning Electron Microscope : SEM.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mfu.ac.th>

[61] C.A. Andrade, F. Ruiz, JR. Martinez-Mendoza, H. Terrones, “Infrared and Raman spectra, conformational stability, ab initio calculations of structure, and vibrational assignment of alpha and beta glucose”, J Mol Struct THEOCHEM, vol. 714, pp. 143–146, 2005.

[62] H.D. Nguyen, T.T. Thuy Mai, N.B. Nguyen Thanh Duy Dang, M.L. Phung Le, T. T. Dang and V. M. Tran, “A novel method for preparing microfibrillated cellulose from bamboo fiber“, Advances in natural science, vol. 4, 2013.

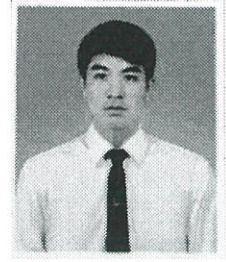
[63] A. Darhuber, S.M. Trojan, and S. Miller, “Morphology of liquid microstructure on chemically patterned surfaces”, Journal of Applied Physics, vol. 87, pp. 7768-7775, 2000.

[64] S. Herminghaus, “Liquid microstructures at solid interfaces”, Journal of Physics, vol. 11, pp. 57-74, 1999.

[65] S. Herminghaus, “Roughness-induced nonwetting”, Europhysics Letters, vol. 52, pp. 165-170, 2000.

[66] วชิราภรณ์ กันฟู่ม , พัศตราภรณ์ แจ่มสุวรรณ , นาวิณ วิริยะเอี่ยมพิกุลม , อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ , 2557, “ซูเปอร์ไฮโดรโฟบิกนาโนคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนเซชันเพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับคราบน้ำมัน”, วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล

ชลกานต์ หริกกุลสวัสดิ์

วัน เดือน ปีเกิด

9 มิถุนายน 2539

ที่อยู่

289 หมู่ 3 ถ.รัตนมาลี ต.นาแก อ.นาแก จ.นครพนม 48130

E-mail

chonlakarn.harikunsawad@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจุฬารามรณราชวิทยาลัย  
มุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร

ประวัติการฝึกงาน

National Metal and Materials Technology Center (MTEC)  
จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

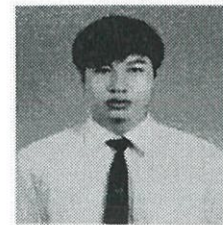
[1] Rawipon Chotenoparat, Chonlakarn Harikunsawad, Napat Kaewtrakulchai, Gasidit Panomsuwan and Apiluck Eiad-ua, Carbon Fiber form Cattail Flower via Hydrothermal Carbonization, PACCON 2019 Proceeding (Accepted).

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

[1] Rawipon Chotenoparat, Chonlakarn Harikunsawad, Napat Kaewtrakulchai, Gasidit Panomsuwan and Apiluck Eiad-ua, Carbon Fiber form Cattail Flower via Hydrothermal Carbonization, The Pure and Applied Chemistry International Conference 2019 (PACCON 2019) February 7 - 8, 2019 in Bangkok, THAILAND.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)



ชื่อ-นามสกุล	รวีพล โชตินพรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	26 มิถุนายน 2539
ที่อยู่	99 หมู่ 14 ต.วังสะพุง อ.วังสะพุง จ.เลย 42130
E-mail	rawipon.folk@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเลยพิทยาคม จังหวัดเลย
ประวัติการฝึกงาน	National Metal and Materials Technology Center (MTEC) จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] Rawipon Chotenoparat, Chonlakarn Harikunsawad, Napat Kaewtrakulchai, Gasidit Panomsuwan and Apiluck Eiad-ua, Carbon Fiber form Cattail Flower via Hydrothermal Carbonization, PACCON 2019 Proceeding (Accepted).

### ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

[1] Rawipon Chotenoparat, Chonlakarn Harikunsawad, Napat Kaewtrakulchai, Gasidit Panomsuwan and Apiluck Eiad-ua, Carbon Fiber form Cattail Flower via Hydrothermal Carbonization, The Pure and Applied Chemistry International Conference 2019 (PACCON 2019) February 7 - 8, 2019 in Bangkok, THAILAND.