

การพัฒนาโฟมยางธรรมชาติโดยใช้กราฟีนออกไซด์  
และซิลเวอร์นาโน

DEVELOPMENT OF NATURAL RUBBER FOAM USING  
GRAPHENE OXIDE AND SILVER NANOPARTICLES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2561  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF NATURAL RUBBER FOAM USING  
GRAPHENE OXIDE AND SILVER NANOPARTICLES




A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาโฟมยางธรรมชาติโดยใช้กราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโน Development of Natural Rubber Foam using Graphene Oxide and Silver Nanoparticles		
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ธนัชพร ฐิตะกาญจน์	รหัสนักศึกษา	58050479
	นางสาว อภิษฎา อมรศุภรศาสตร์	รหัสนักศึกษา	58050571
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร.นภยา หมีนแดง กรรมการ	
ดร.ขวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาโพลีเมอร์ธรรมชาติโดยใช้กราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโน
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ธนัชพร ฐิตะกาญจน์ รหัสนักศึกษา 58050479 นางสาว อภิษฎา อมรศุภรศาสตร์ รหัสนักศึกษา 58050571
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียม วิเคราะห์และศึกษาสมบัติของโพลีเมอร์ธรรมชาติ (NRF) โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ (NRF+GO) และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน (NRF+GO+AgNPs) ซึ่งกระบวนการเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมเตรียมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบดันตอป (Dunlop's process) โดยทำการคงที่ปริมาณน้ำยาธรรมชาติภายใต้การเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างๆ (0.0002 0.0006 และ 0.001 phr) และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ (0.0005 0.001 และ 0.002 phr) จากนั้นทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible) พูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) และเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact Angle) ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมจะมีพิกเอกลักษณ์สอดคล้องกับยางธรรมชาติตั้งต้น ในขณะที่เทคนิครามานเป็นสิ่งยืนยันว่ากราฟีนออกไซด์ (GO) อยู่ในเมทริกซ์ของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมทั้งหมด จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงให้เห็นว่าลักษณะพื้นผิวของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมมีรูพรุนเป็นทรงกลม รูพรุนมีขนาดเล็กและขนาดใหญ่สลับกัน ยกเว้นโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร (0.0002 phr) ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร (0.0006 phr) จะมีค่าการทดสอบแรงดึง และค่าการต้านทานแรงกดสูงที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ธรรมชาติ ค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมจะมีค่าที่สูงกว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ Agar disc diffusion โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด คือ *S. aureus* (แกรมบวก) และ *E. coli* (แกรมลบ) ซึ่งจากการทดสอบพบว่า โฟมยางธรรมชาติผสมจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบได้เป็นอย่างดี โดยความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน จากผลวิจัยที่ได้นำเสนอข้างต้น อาจจะบอกเป็นนัยว่าโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน อาจจะใช้เป็นวัสดุอัจฉริยะได้ในอนาคต

**คำสำคัญ :** กระบวนการขึ้นรูปแบบดันลอป (Dunlop’s process) กราฟีนออกไซด์ น้ำยางธรรมชาติ โฟมยางธรรมชาติ สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อนุภาคซิลเวอร์นาโน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Development of Natural Rubber Foam using Graphene Oxide and Silver Nanoparticles	
<b>Students</b>	Miss Thanatchaporn Thitakarn	Student ID 58050479
	Miss Apisada Amornsupornsath	Student ID 58050571
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
<b>Department</b>	Chemistry	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic Year</b>	2018	
<b>Advisor</b>	Dr. Chaval Sriwong	

### Abstract

This special project studied the preparation, characterization and some properties of natural rubber foam (NRF) and natural rubber foam mixed with graphene oxide (NRF-GO) and graphene oxide-silver nanoparticles (NRF-GO+AgNPs) composites. In the preparation, all NRF and NRF composite samples were prepared by a Dunlop' process using natural rubber latex as a main material under the varying amounts of GO (0.0002, 0.0006, 0.001 phr) and silver nanoparticles (0.0005, 0.001, 0.002 phr), respectively. Then, all samples were characterized and also confirmed by a several techniques, such as, XRD, UV-vis, FTIR, Raman, SEM, EDS, TGA and water contact angle. The results demonstrated that the crystalline phase and functional groups of NRF and NRF composites are corresponding to pristine natural rubber sample. While Raman spectra confirmed the GO exist into the matrix of all NRF composites. SEM results showed that the NRF and all NRF composite had rigid spherical-like structure with composing of micro and macro porous, except NRF-GO-5 (0.001 phr) sample. From the mechanical property studies, the NRF loaded with 0.0006 phr GO (NRF-GO-3) exhibited the highest both tensile and compressive tests. Compared with NRF, the water contact angle of all NRF composites had higher than pristine NRF sample. Moreover, the antibacterial properties of all NRF and NRF composites samples were investigated using an agar disc diffuse method against

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gram-positive bacterial (*S. Aureus*) and Gram-negative (*E. Coli*), respectively. The results revealed that all NRF composite samples exhibited a good antibacterial against both *S. Aureus* and *E. Coli*. The antibacterial performances of all NRF composite samples were increased with increasing of both GO and silver nanoparticles contents. These results implied that all NRF incorporated with GO and silver nanoparticles may be used as a smart foam material in the future.

**Keywords:** Dunlop' process, Graphene oxide (GO), Natural rubber latex, Natural rubber foam (NRF), Antibacterial property, Silver nanoparticles



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูงทั้งที่ออกนามและมีได้ออกนามที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือในด้านต่างๆ ไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี และช่วยเหลือให้โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ และ ดร.นาถยา หมิ่นแดง ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการในการสอบโครงการพิเศษและให้คำปรึกษา แนะนำแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อความสมบูรณ์ของโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิประสาทความรู้ต่างๆ ให้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการใช้อุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงการใช้งานเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนเอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในการทดลอง

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ ทำให้สามารถดำเนินโครงการพิเศษนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนมาจนสำเร็จการศึกษา

ธนัชพร ฐิตะกาญจน์

อภิษฏา อมรศุภรศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป .....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขต.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>6</b>
2.1 ยางธรรมชาติ.....	6
2.1.1 ประวัติยางธรรมชาติ.....	6
2.1.2 การผลิตยางธรรมชาติ.....	6
2.1.2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ.....	7
2.1.3 ชนิดของยางธรรมชาติ.....	9
2.1.4 โครงสร้างของยางธรรมชาติ.....	10
2.1.5 การรักษาสภาพน้ำยาง.....	10
2.1.6 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	11
2.2 โฟมยางธรรมชาติ.....	12
2.2.1 เทคนิคการผลิตยางฟองน้ำ.....	12
2.2.2 น้ำยางและสารเคมีต่างๆ.....	14
2.3 กราฟีนออกไซด์.....	19
2.3.1 คุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์.....	19
2.3.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 อนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	21
2.4.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	22
2.4.1.1 วิธีการยึงด้วยเลเซอร์ .....	22
2.4.1.2 วิธีการใช้ไมโครเวฟ .....	23
2.4.1.3 วิธีรีดักชันทางเคมี.....	23
2.4.1.4 วิธีเชิงแสงทางเคมี.....	23
2.4.2 กลไกการทำงานของอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	24
2.5 พอลิไวนิลไพโรลิโดน .....	25
2.6 แบคทีเรีย .....	25
2.6.1 โครงสร้างของแบคทีเรีย.....	25
2.6.2 ประเภทของแบคทีเรีย.....	26
2.6.3 ความแตกต่างระหว่างเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ.....	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>30</b>
3.1 สารเคมี.....	30
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	32
3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์.....	32
3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร.....	33
3.3.3 การเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติ.....	34
3.3.4 การเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์.....	35
3.3.5 การเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมซิลเวอร์นาโน.....	36
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์.....	38
3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM).....	38
3.4.2 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDS).....	38
3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM).....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.4 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer).....	39
3.4.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy; FT-IR) .....	39
3.4.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	40
3.4.7 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy) .....	40
3.4.8 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) .....	41
3.4.9 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	41
3.4.10 การทดสอบแรงอัด (Compression Test).....	42
3.4.11 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial Test).....	42
3.4.12 การทดสอบมุมสัมผัส (Contact Angle) .....	42
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>43</b>
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์.....	43
4.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐาน.....	43
4.1.2 ผลการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสง.....	44
4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล.....	45
4.1.4 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน.....	46
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค.....	47
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	48
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสง.....	48
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	49
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม.....	50
4.3.1 ผลการตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐาน.....	50
4.3.2 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล.....	52
4.3.3 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน.....	54
4.3.4 ผลการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสง.....	56
4.3.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค.....	57
4.3.5.1 บริเวณพื้นผิวของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ.....	60
4.3.6.1 โฟมยางธรรมชาติ.....	60
4.3.6.2 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร.....	61
4.3.6.3 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร.....	63
4.3.6.4 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร.....	64
4.3.6.5 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตรกับ อนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 มิลลิลิตร.....	65
4.3.6.6 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตรกับ อนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 มิลลิลิตร.....	66
4.3.6.7 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตรกับ อนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร.....	68
4.3.7 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อน.....	69
4.3.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	72
4.3.8.1 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	73
4.3.9 ผลการวิเคราะห์ศึกษาสมบัติเชิงกล.....	79
4.3.10 ผลการวิเคราะห์การวัดมุมสัมผัส.....	88
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>94</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	95
5.1.1 สรุปผลคุณลักษณะของสารตัวเติมกราฟีนออกไซด์และ อนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	95
5.1.2 สรุปผลคุณลักษณะของโฟมยางธรรมชาติ โฟมยางธรรมชาติผสม กราฟีนออกไซด์ และโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับ อนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	96
5.1.3 สรุปผลสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน การวัดมุมสัมผัส และประสิทธิภาพการยับยั้ง เชื้อแบคทีเรียของโฟมยางธรรมชาติ โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	97
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง .....	99
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก.....	104
ภาคผนวก ข.....	106
ภาคผนวก ค.....	107
ภาคผนวก ง.....	111
ภาคผนวก จ.....	114
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ของน้ำยางธรรมชาติ.....	7
2.2 แสดงส่วนประกอบของเนื้อยางแห้ง.....	8
3.1 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำโฟมยางธรรมชาติ.....	37
3.2 แสดงปริมาณกราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโนของแต่ละตัวอย่าง ในการทำโฟมยางธรรมชาติ.....	38
4.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสม.....	70
4.2 แสดงค่าการต้านทานแรงดึงของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสม กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	79
4.3 แสดงค่าการต้านทานแรงดึงของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสม กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	80
4.4 แสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกดของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติ ผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	80
4.5 แสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกดของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสม กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพแสดงโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide).....	3
2.1 แสดงแบบจำลองอนุภาคของยางธรรมชาติ.....	7
2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	8
2.3 แสดงโพลียางธรรมชาติที่ผลิตโดยเทคนิค Dunlop's process.....	13
2.4 แสดงโพลียางธรรมชาติที่ผลิตโดยเทคนิค Talalay's process.....	14
2.5 แสดงโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide).....	19
2.6 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์.....	20
2.7 ภาพ TEM แสดงชั้นบางๆ ของกราฟีนออกไซด์.....	21
2.8 แสดงกลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	24
2.9 แสดงโครงสร้างของพอลิไวนิลไพโรลิโดน.....	25
2.10 แสดงโครงสร้างของแบคทีเรีย.....	26
2.11 แสดงความแตกต่างระหว่างผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ.....	28
3.1 สารแขวนลอยกราฟีน (GO) เข้มข้น.....	33
3.2 สารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร.....	33
3.3 การเพิ่มขึ้นรูปโพลียางในแบบพิมพ์.....	34
3.4 แสดงภาพตัวอย่างโพลียางธรรมชาติและโพลียางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	36
3.5 แสดงภาพตัวอย่างโพลียางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	37
4.1 แสดง XRD Pattern ของผงกราไฟต์ (Graphite) ผงกราฟีนออกไซด์ (GO).....	43
4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO).....	44
4.3 แสดง FTIR สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ (GO).....	45
4.4 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของกราไฟต์และกราฟีนออกไซด์.....	46
4.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง (a) และ (b) SEM ที่กำลังขยาย 3000x ของผงกราไฟต์.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง (a) SEM ที่กำลังขยาย 3000x เท่าของผงกราฟีนออกไซด์ และ (b) TEM ของกราฟีนออกไซด์.....	48
4.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิลเวอร์นาโน หลังเข้าไมโครเวฟ.....	49
4.8 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง TEM ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน และ ขนาดของการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยอัตราส่วน PVP ที่ 1:1 .....	49
4.9 แสดงสีของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน (a) ก่อนผ่านกระบวนการทางไมโครเวฟ และ (b) หลังผ่านกระบวนการทางไมโครเวฟ 210 วินาที.....	50
4.10 แสดง XRD pattern ของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ ที่ปริมาณต่างๆ (a) NRF (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 (d) NRF+GO-5.....	50
4.11 แสดง XRD pattern ของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ (a) NRF (b) NRF+GO-3+Ag-0.25 (c) NRF+GO-3+Ag-0.5 (d) NRF+GO-3+Ag-1.....	51
4.12 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) NRF (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 (d) NRF+GO-5.....	52
4.13 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) NRF (b) NRF+GO-3+Ag-0.25 (c) NRF+GO-3+Ag-0.5 (d) NRF+GO-3+Ag-1.....	53
4.14 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	54
4.15 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	55
4.16 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	56
4.17 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	57
4.18 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณพื้นผิว (Surface) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่กำลังขยาย (a) 500x เท่า (b) 1000x เท่า และ (c) 2000x เท่า.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย (I) 500x เท่า (II) 1000x เท่า (III) 2000x เท่า ของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม (a) NRF+GO-1 (b) NRF+GO-3 (c) NRF+GO-5.....	58
4.20 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย (I) 500x เท่า (II) 1000x เท่า (III) 2000x เท่า ของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม (a) NRF+GO-3+AgNPs-0.25 (b) NRF+GO-3+AgNPs-0.5 (c) NRF+GO3+AgNPs1.....	59
4.21 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัว ของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na).....	61
4.22 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-1 และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัว ของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na).....	62
4.23 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-3 และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัว ของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na).....	63
4.24 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-5 และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัว ของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na).....	64
4.25 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-3+AgNPs-0.25 และแผนที่ธาตุ แสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na).....	66
4.26 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-3+AgNPs-0.5 และแผนที่ธาตุ แสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na).....	67
4.27 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-3+AgNPs-1 และแผนที่ธาตุ แสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม(Na).....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของโพลีเมอร์ชนิดที่ไม่มีสารตัวเติม (a) NRF เปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ชนิดผสม (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 (d) NRF+GO-5.....	69
4.29 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของโพลีเมอร์ชนิดที่ไม่มีสารตัวเติม (a) NRF เปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ชนิดผสม (b) NRF+GO-3+AgNPs-1.....	70
4.30 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ DTG ของโพลีเมอร์ชนิดที่ไม่มีสารตัวเติม (a) NRF เปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ชนิดผสม (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 (d) NRF+GO-5.....	71
4.31 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ DTG ของโพลีเมอร์ชนิดที่ไม่มีสารตัวเติม (a) NRF เปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ชนิดผสม (b) NRF+GO-3+AgNPs-1.....	71
4.32 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของโพลีเมอร์ชนิดผสม และโพลีเมอร์ชนิดผสม.....	73
4.33 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของโพลีเมอร์ชนิดผสม และโพลีเมอร์ชนิดผสม.....	74
4.34 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของโพลีเมอร์ชนิดผสม และโพลีเมอร์ชนิดผสม.....	75
4.35 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของโพลีเมอร์ชนิดผสม และโพลีเมอร์ชนิดผสม.....	76
4.36 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของโพลีเมอร์ชนิดผสม และโพลีเมอร์ชนิดผสม.....	77
4.37 กราฟแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ โดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมอร์ชนิดผสมและโพลีเมอร์ชนิดผสม ผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	78
4.38 กราฟแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ โดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมอร์ชนิดผสม โพลีเมอร์ชนิดผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิกรัม และโพลีเมอร์ชนิดผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิกรัม กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum (Tensile testing) ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์กับ อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	81
4.40 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness (Tensile testing) ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	82
4.41 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus (Tensile testing) ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์กับ อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	82
4.42 แสดงการเปรียบเทียบ Load at break (Tensile testing) ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์กับ อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	83
4.43 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	83
4.44 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	84
4.45 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum (Compression testing) ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์กับ อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	84
4.46 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus (Compression testing) ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์กับ อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	85
4.47 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness (Compression testing) ของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์กับ อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างกราฟ Compression testing ของโพลีเมอร์ธรรมชาติและ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	86
4.49 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างกราฟ Compression testing ของโพลีเมอร์ธรรมชาติและ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ.....	86
4.50 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของโพลีเมอร์ธรรมชาติ.....	89
4.51 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของโพลีเมอร์ธรรมชาติ ผสมกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร (NRF+GO-1).....	89
4.52 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมอร์ธรรมชาติ ผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร (NRF+GO-3).....	90
4.53 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมอร์ธรรมชาติ ผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร (NRF+GO-5).....	90
4.54 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 มิลลิลิตร (NRF+GO-3+AgNPs-0.25).....	91
4.55 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 มิลลิลิตร (NRF+GO-3+AgNPs-0.5).....	91
4.56 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร (NRF+GO-3+AgNPs-1).....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) หรือยางพารา เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2559 มีพื้นที่ปลูกยางทั้งสิ้น 19,613,559 ไร่ มากเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งภาคใต้มีพื้นที่ปลูกยางมากที่สุด ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติอันดับหนึ่งของโลก ผลผลิตมีทั้งยางแปรรูปขั้นต้น เช่น ยางแผ่นรมควันยางแท่ง น้ำยางข้น และยางชนิดอื่นๆ รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตยางยานพาหนะ ยางยืด ถุงมือยาง และยางรัดของ เป็นต้น การส่งออกของประเทศส่วนใหญ่เป็นยางแปรรูปขั้นต้น ยางธรรมชาติจึงเป็นสินค้าเกษตรที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศ ทั้งในด้านการส่งออกและการจ้างแรงงานภายในประเทศด้วย [1]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazillensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่ น้ำอเมซอน น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 25-35 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated rubber latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกไปสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นตัววัตถุดิบในอุตสาหกรรม [2]

ลักษณะเด่นอีกอย่างของธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ 1. ทนทานต่อแรงดึงได้น้อยทำให้ฉีกขาดได้ง่าย 2. ขึ้นรา หรือแบคทีเรียง่ายทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน 3. การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น คาร์บอนแบล็คหรืออนุพันธ์

ของคาร์บอน ซัลเฟอร์ ซิงออกไซด์ และโลหะซิลเวอร์นาโน เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมบัติบางประการ ไม่ว่าจะเป็นการต้านเชื้อราที่สังเคราะห์ขึ้น หรือการเติมสารกันบูดเพื่อป้องกันการเน่าเสียของยาง อย่างไรก็ตาม ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

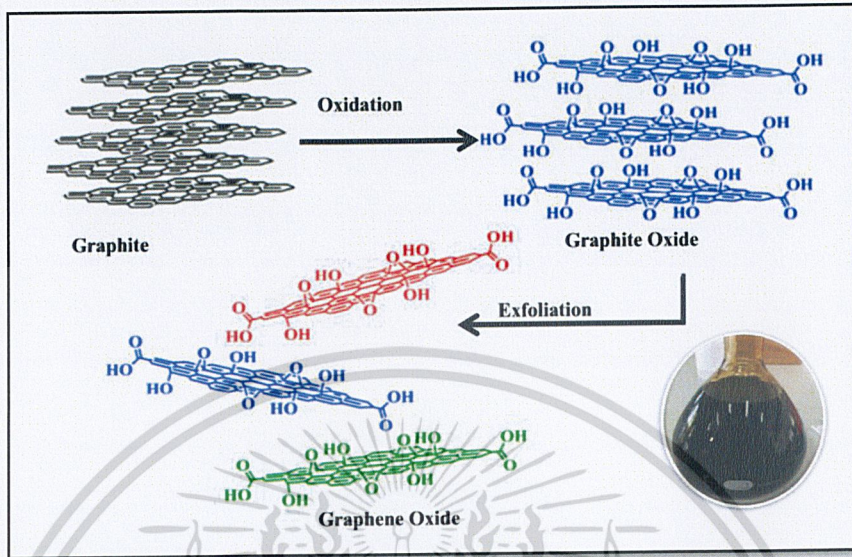
เช่น สมบัติเชิงกลให้สูงขึ้นและเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อที่เรีย เพื่อที่ยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์  
 ยางธรรมชาติ รวมทั้งยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่โดดเด่นบางประการให้กับยางธรรมชาติอีกด้วย [2]

ผลิตภัณฑ์โพลียางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติ ถือได้ว่าเป็นอีกหนึ่ง  
 ผลิตภัณฑ์ที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากที่สุด มีลักษณะเป็นรูปพุนเหมาะที่ใช้  
 ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก เบาะนั่ง ที่นอน หมอน และ ตุ๊กตา หลักการสำคัญของการผลิตโพลี  
 ยางธรรมชาติคือการทำให้น้ำยางเกิดฟองของอากาศหรือของแก๊สต่างๆ แล้วทำให้ฟองยังคงรูปหรือ  
 การวัลคาไนซ์ด้วยสารเคมีและความร้อน ในปัจจุบันเทคนิคการผลิตยางพองน้ำ แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี  
 คือ 1. เทคนิคแบบ Dunlop's process 2. เทคนิคแบบ Talalay's process [3] ซึ่งทั้ง 2 วิธี จะได้  
 โพลียางธรรมชาติออกมาแตกต่างกันเล็กน้อยโดยกระบวนการ Talalay จะได้โพลียางธรรมชาติที่มี  
 รูปพุนที่เป็นระเบียบ ขนาดรูปพุนเท่าๆกัน แต่วิธี Talalay จะเป็นวิธีการที่ซับซ้อนที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้  
 กับน้ำยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของยางสังเคราะห์ ซึ่งวิธีนี้จะช่วยลดการสูญเสียของน้ำยางได้ แต่มี  
 ข้อเสียก็คือ มีการลงทุนที่มาก และใช้พลังงานมาก สำหรับทำให้เย็นแล้วทำให้ร้อน ดังนั้นการผลิต  
 แบบกระบวนการ Dunlop จึงถือว่าเป็นเทคนิคที่ประหยัดพลังงาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม  
 มากกว่า วิธีแบบกระบวนการ Talalay โดยวิธีแบบกระบวนการ Dunlop เป็นกระบวนการผลิต  
 โพลียางธรรมชาติด้วยกระบวนการทางเคมีใช้กับยางธรรมชาติ โดยใช้สารเคมีทำให้น้ำยางธรรมชาติเกิด  
 โพลียางเป็นครีมเหลวคล้ายวิปครีม เกล็ดแบบหล่อขึ้นรูปจนเต็ม อบอุ่นด้วยความร้อนจนยางสุก นำ  
 ออกจากแม่พิมพ์ นำเข้ากระบวนการล้างสารเคมีออกไม่ให้มีกลิ่นเหม็นของสารเคมี และอบให้แห้ง  
 ก็จะได้โพลียางธรรมชาติ [4] แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกลและเพิ่มความหลากหลาย  
 ของผลิตภัณฑ์โพลียางธรรมชาติหรือยางพารา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเพิ่มสมบัติเชิงกลโดย  
 กราฟีนออกไซด์ลงไป อีกทั้งยังได้ทำการเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ดีให้กับผลิตภัณฑ์  
 โพลียางธรรมชาติด้วยการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไป

กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide; GO) เป็นอนุพันธ์หนึ่งของวัสดุกราฟีน (Graphene  
 material) มีความหนาเพียงคาร์บอน 1 อะตอมหรือเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งมีสมบัติในเรื่องความ  
 แข็งแรงคงทน เชิงกลสูง เนื่องจากมีค่ามอดูลัสของยังที่สูง เป็นฉนวนความร้อนที่ดี มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง  
 และมีความยืดหยุ่นสูง เป็นต้น [5,6] โดยสามารถทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี เริ่มต้นด้วยการใช้  
 กรดแก่หรือตัวออกซิแดนท์มาออกซิไดส์แกรไฟต์ก็จะได้ “แกรไฟต์ออกไซด์” ซึ่งจะมีกลุ่มของออกไซด์  
 ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิลิกและคาร์บอนิลจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นและเกาะเต็มระนาบพื้นผิวในแต่  
 ละชั้นของแกรไฟต์ ทำให้แต่ละชั้นของแกรไฟต์กว้างขึ้นและลดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้น หาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 แกรไฟต์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแรงที่มากพอ เช่น ด้วยการใช้อคลื่นความถี่สูง (Sonication)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็สามารถหลุดลอกออกเป็นแผ่นคาร์บอน ที่เรียกว่า “แกรฟีนออกไซด์” (Graphene oxide) นั่นเอง ซึ่งกราฟีนออกไซด์จะมีสมบัติเป็น hydrophilic ละลายได้ดีในน้ำ ดังนั้นจึงมีการเตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอย จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป [7]



รูปที่ 1.1 ภาพแสดงโครงสร้างของแผ่นกราฟีนออกไซด์ (GO)

ซิลเวอร์นาโน (Silver Nano) คือ เทคโนโลยีการสังเคราะห์เงินหรือซิลเวอร์ (Silver) ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (Nanometer) คือ มีขนาดไม่เกิน 100 นาโนเมตร เทียบเท่ากับดีเอ็นเอในร่างกายของมนุษย์ และเนื่องจากขนาดเล็ก จึงทำให้มีปริมาณพื้นที่ผิวสูง ซึ่งสามารถสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น โลหะเงินสามารถแตกตัวเป็นประจุบวก ( $Ag^+$ ) ในระดับอนุภาคนาโน จากนั้นอนุภาคซิลเวอร์จะไปเกาะที่ผนังของเชื้อแบคทีเรีย และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ พร้อมกับเข้าจับกับหมู่ซัลเฟต (Sulphate) ของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เผาผลาญออกซิเจน และพลังงาน ทำให้เอนไซม์และการเผาผลาญพลังงานเกิดผิดปกติ จนแบคทีเรียถูกทำลาย และตาย อนุภาคของซิลเวอร์นาโนสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากถึง 650 ชนิด โดยเฉพาะแบคทีเรียสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการใช้ชีวิตมนุษย์ อาทิ แบคทีเรียสเตรปโตคอคคัส (Streptococcus) แบคทีเรียแลคโตบาซิลลัส (Lactobacillus) แบคทีเรียสแตฟิโลค็อกคัส (Staphylococcus) และ อีโคไล (Escherichia coli, E. coli) ที่มักพบในอาหารที่เน่าเสีย [8] อ้างอิงได้จากงานวิจัยของ Xiuju Liu และคณะ ซึ่งได้จากการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของ polyetheretherketone (PEEK) ที่เคลือบด้วยซิลเวอร์นาโน โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง [9]

โดยทั่วไปการสังเคราะห์ซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีการยิงด้วยเลเซอร์หรือวิธีรีดักชันทางเคมีโดยใช้สารรีดักแทนต์ แต่วิธีที่ได้รับความนิยมอีกวิธีหนึ่งวิธีก็คือ การสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารรีดักแทนต์ด้วยวิธีใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นรังสีไมโครเวฟ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะใช้ ซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ทำปฏิกิริยากับ Polyvinylpyrrolidone (PVP) ซึ่งใช้เป็นตัวรีดิวซ์และรักษาเสถียรภาพซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟภายใน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเวฟ สารละลายจะมีการเปลี่ยนสีอย่างรวดเร็ว (2-3 นาที) จากใสไม่มีสีเป็นสีเหลืองน้ำตาล ก็แสดงให้เห็นว่าเกิดเป็นอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนในลักษณะคอลลอยด์แล้ว

ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติ เช่น สมบัติเชิงกล และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ของผลิตภัณฑ์โฟมยางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการเติมกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในโฟมยางธรรมชาติด้วยวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบกระบวนการดันลอป ซึ่งเป็นกระบวนการที่เตรียมได้ง่าย และรวดเร็ว โดยได้ทำการศึกษาผลของปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของโฟมยางธรรมชาติผสมนี้ รวมถึงยังได้ทำการศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโฟมยางธรรมชาติ โดยใช้เทคนิคต่างๆ อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและเตรียมโฟมยางธรรมชาติจากน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้นกับสารตัวเติมต่างๆ ได้แก่ กราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโน เป็นต้น
- 2) เพื่อศึกษาผลจากการเติมกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติผสม
- 3) เพื่อศึกษาผลของการเติมซิลเวอร์ขนาดนาโน ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อของโฟมยางธรรมชาติ
- 4) เพื่อศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโฟมยางธรรมชาติชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้เทคนิคต่างๆ
- 5) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ขึ้น
- 6) เพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของโฟมยางธรรมชาติชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์
- 7) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของโฟมยางธรรมชาติชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาวิธีการเตรียมโฟมยางธรรมชาติด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกระบวนการดันลอป (Dunlop's process)
- 2) ศึกษาวิธีการเตรียมกราฟีนออกไซด์ และศึกษาผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.0002 phr 0.0006 phr และ 0.001 phr ลงในโฟมยางธรรมชาติ
- 3) ศึกษาวิธีการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน และศึกษาผลของการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.0005 phr 0.001 phr และ 0.002 phr ลงในโฟมยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ได้แก่ การทดสอบแรงดึง (Tensile test) และการทดสอบแรงกด (Compressive test) โดยใช้เครื่องมือ Universal testing machine (UTM)
- 5) ศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยกระบวนการ Agar disc diffusion โดยการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 เชื้อ คือ 1. *S.aureus* (แกรมบวก) 2. *E.coli* (แกรมลบ)
- 6) พิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น Raman SEM EDS FT-IR UV-visible และ XRD เป็นต้น รวมทั้งมีการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน ด้วยเทคนิค TGA และ DSC อีกด้วย

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับกรรมวิธีในการเตรียมโพลีเอทิลีนและสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์
- 2) ได้รับความรู้ในการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยใช้กระบวนการ microwave
- 3) ได้เพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเตรียมโพลีเอทิลีน นั่นก็คือโพลีเอทิลีนที่สามารถนำมาพัฒนาต่อเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก วัสดุรองพื้น ปูพื้น เบาะนั่ง และ ที่นอน
- 4) ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการนำกราฟีนออกไซด์ ไปใช้เป็นสารตัวเติมในการพัฒนาโพลีเอทิลีน
- 5) ได้โพลีเอทิลีนที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีคุณสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรียที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้ เช่น ที่นอนสำหรับผู้ป่วยติดเตียงในโรงพยาบาล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubbers, NR)

#### 2.1.1 ประวัติยางธรรมชาติ [10]

ยางธรรมชาติเป็นน้ำยางจากต้นไม้อินตันมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งคือยางพาราหรือต้นยางพารา ยางธรรมชาติมีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิล และเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งชาวอินเดียนแดงเผ่ามายัน ในอเมริกากลาง ได้รู้จักการนำยางพารามาใช้ก่อนปี พ.ศ. 2000 โดยการจุ่มเท้าลงในน้ำยางดิบเพื่อทำเป็นรองเท้า ส่วนเผ่าอื่น ๆ ก็นำยางไปใช้ประโยชน์ในการทำผ้ากันฝน ทำขวดใส่ น้ำ แวะทำลูกบอลอย่างเล่นเกมต่าง ๆ เป็นต้น จนกระทั่ง คริสโตเฟอร์ โคลัมบัสได้เดินทางมาสำรวจทวีปอเมริกาใต้ ในระหว่างปี พ.ศ. 2036-2039 และได้พบกับชาวพื้นเมืองเกาะไฮติที่กำลังเล่นลูกบอลยางซึ่งสามารถกระดอนได้ ทำให้คณะผู้เดินทางสำรวจประหลาดใจจึงเรียกว่า "ลูกบอลผีสิง"

ต่อมาในปี พ.ศ. 2279 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อชาลส์ มาริเดอลา คองตามีน (Charles Merie de la Condamine) ได้ให้ชื่อเรียกยางตามคำพื้นเมืองของชาวไมกาว่า "คาโอชู" (Caoutchouc) ซึ่งแปลว่าต้นไม้อรงให้ และให้ชื่อเรียกของเหลวที่มีลักษณะข้นขาวคล้ายน้ำมันซึ่งไหลออกมาจากต้นยางเมื่อกรีดเป็นรอยแผลว่า ลาเทกซ์ (latex) และใน พ.ศ. 2369 ฟาราเดย์ (Faraday) ได้รายงานว่ายางธรรมชาติเป็นสารที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน มีสูตรเอมไพริคัล คือ  $C_5H_8$  หลังจากนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของยางพาราเพื่อให้ใช้งานได้กว้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์

#### 2.1.2 การผลิตยางธรรมชาติ

แหล่งผลิตยางธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในโลกคือ แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คิดเป็นร้อยละ 90 ของแหล่งผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือมาจากแอฟริกากลาง ซึ่งพันธุ์ยางที่ผลิตในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คือ พันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) น้ำยางที่กรีดได้จากต้นจะเรียกว่าน้ำยางสด (field latex) น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ในน้ำ (emulsion) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 30-40 pH 6.5-7 น้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ ส่วนประกอบในน้ำยางสดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ 1.ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35 เปอร์เซ็นต์ 2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65 เปอร์เซ็นต์

### 2.1.2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารที่ไม่บริสุทธิ์ มีปริมาณของเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่าง 25-45 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็งและสารที่เป็นเนื้อยางแห้งประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ น้ำยางประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ ของน้ำยางธรรมชาติ ดังแสดงตารางที่ 2.1

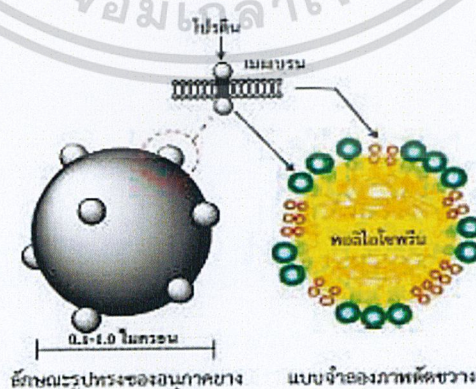
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ของน้ำยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	22-48
ปริมาณเนื้อยางแห้ง	25-45
สารจำพวกโปรตีน	1.5
สารพวกเรซิน	2.0
คาร์โบไฮเดรต	1.0
สารอนินทรีย์	0.5

ส่วนประกอบของน้ำยางข้างต้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ

#### 1. ส่วนที่เป็นเนื้อยาง

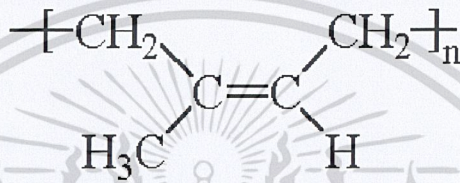
น้ำยางธรรมชาติ ประกอบด้วยอนุภาคยางขนาดต่างๆ ถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมันและโปรตีน โดยโปรตีนจะล้อมรอบอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาค (รูปที่ 2.1) ส่วนใหญ่เป็นชนิดแอลฟา กลูบูลิน ( $\alpha$ -Globulin) และฮีวิน (Hevein) ส่วนไขมันจะอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิดชนิด  $\alpha$ -Lecithin ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง



รูปที่ 2.1 แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยในน้ำ ประกอบด้วยสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีโครงสร้างทางเคมีว่า ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 polyisoprene) (รูปที่ 2.2 ) ลักษณะอนุภาคเป็นรูปค่อนข้างทรงกลมหรือคล้ายลูกแพร์ มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-1.0 ไมครอน ค่าน้ำหนักโมเลกุล มวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนมวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับอายุและสายพันธุ์ของยาง โดยค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 104-106 ดาลตัน มวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน มีค่าประมาณ 105 ดาลตัน ในขณะที่มวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักมีค่าสูงกว่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน คือ ประมาณ 106 ดาลตันและค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง อยู่ระหว่าง 2-11 ซึ่งบ่งบอกถึงความแตกต่างของโมเลกุลของยางธรรมชาติ



รูปที่ 2.2 ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน

เมื่อนำอนุภาคเม็ดยางมาวิเคราะห์ พบส่วนประกอบของเนื้อยางแห้งโดยประมาณ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเนื้อยางแห้ง

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
เนื้อยางไฮโดรคาร์บอน	86
น้ำ กระจายในเนื้อยาง	10
สารพวกโปรตีน	1
สารพวกไขมัน	3

## 2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

ประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ เป็นส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมดที่ไม่ใช่ยาง แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

2.1 ส่วนที่เป็นน้ำ หรือเซรัม (Serum) ประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อ มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและกรดอะมิโน

2.2 ส่วนของลูทอยด์ (Lutoids) และสารอื่นๆ โดยลูทอยด์เป็นอนุภาคค่อนข้างกลม ห่อหุ้มด้วยเยื่อบางๆ ภายในมีทั้งสารละลายและสารที่แขวนลอย มีค่า pH 5.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน รวมถึงยังมีสารพวกฟอสโฟไลปิด และสารพอลิฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยาง

มีสีเหลืองหรือสีคล้ำ เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ และสารอื่นๆ หรือที่เรียกว่า อนุภาคเฟรย์วีสลิง (Frey wysling) มีอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม ไม่ว่องไวเท่า ยางอื่น หักง่ายแตกหักง่าย และต้องอาศัยการนำเอาสารเหล่านี้ไปใช้

ประกอบด้วยสารคาโรตีนอยด์ ที่ทำให้ยางมีสีเหลือง หากนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูง ประมาณ 20,000 รอบต่อนาที สามารถแยกน้ำยาง ออกได้ 4 ส่วน ได้แก่

1. ชั้นบนสุด เป็นส่วนของเนื้อยางแห้งมีอยู่ประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะเป็นครีมสีขาว ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของยาง แต่อาจมีโปรตีน ไขมัน หรืออนุมูลของโลหะ เจือปนอยู่บ้างเล็กน้อย
2. ชั้นถัดมาที่ติดกับเนื้อยาง เป็นอนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey Wyssling) มีสีเหลืองกว่าอนุภาคยางจะมีอยู่ ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์
3. ชั้นที่สาม เป็นเซรัม (Serum) เป็นสีเหลืองใส มีอยู่ประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ ประกอบไปด้วย คาร์โบไฮเดรต โปรตีน สารประกอบของกรดนิวคลีอิก อนุมูลของโลหะ และอนินทรีย์สาร
4. ชั้นล่างสุด เป็นตะกอนสีเหลือง สีน้ำตาล หรือสีขาว มีอยู่ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารพวกลูทอยด์ (Lutoids) โลหะหนักพวกแมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และซีลีเนียม

### 2.1.3 ชนิดของยางธรรมชาติ [12]

ยางธรรมชาติที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันเป็นวัตถุดิบที่ได้จากการแปรรูปชั้นต้นของน้ำยางสดจากต้นยางพารา โดยทั่วไปสามารถนำมาแปรรูปเป็นยางดิบได้ 2 แบบ คือ

#### 1. น้ำยางข้น (concentrated rubber latex)

การนำน้ำยางสดจากแหล่งต่างๆ มารวบรวมแล้วนำไปผ่านกระบวนการทำให้เข้มข้นขึ้น โดยการแยกน้ำออกจากเนื้อยางซึ่งมีทั้งหมด 4 วิธี การระเหย การทำครีม การแยกด้วยไฟฟ้า และกระบวนการปั่นเหวี่ยง โดยกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) จะได้รับความนิยมในการทำน้ำยางข้น ซึ่งจะได้น้ำยางความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ น้ำยางขข้นมี 2 ชนิด คือ

1. น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia, HA) เป็นน้ำยางข้นที่ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.7 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับกรดลอรริก 0.04 เปอร์เซ็นต์ น้ำยางชนิดนี้มีข้อดีคือมีอายุการใช้งานได้นาน ไม่เสี้ง่าย จึงมักนำไปผลิตถุงมือยาง กาวยาง ถุงยางอนามัย เป็นต้น ยกเว้นยางฟองน้ำเนื่องจากแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำยางจะไปยับยั้งการเกิดเจลหรือเกิดฟองในน้ำยางทำให้ได้ฟองน้ำที่ด้อยคุณภาพ (หากใช้ในยางฟองน้ำขั้นแรกจะต้องปั่นน้ำยางเพื่อไล่แอมโมเนียก่อน)

2. น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia, LA) เป็นน้ำยางข้นที่ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.2 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับทีเอ็มทีดี 0.01 เปอร์เซ็นต์ ซิงก์ออกไซด์ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และกรดลอรริก 0.04 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำยางชนิดที่ใช้แอมโมเนียน้อยในการรักษาสภาพ นอกจากสารเหล่านี้ยังมีการใช้สารรักษาสภาพอื่นๆ ด้วย เช่น แซดดีอีซีร่วมกับกรดลอรริกหรือกรดบอริกร่วมกับกรดลอรริก เป็นต้น

น้ำยางชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia latex) ส่วนใหญ่นำไปใช้ในกระบวนการผลิตยางฟองน้ำ แต่อายุการเก็บรักษาของน้ำยางชนิดนี้จะสั้นกว่าน้ำยางชนิดแอมโมเนียสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ยางแห้ง (Dry rubber)

ยางธรรมชาติในรูปของยางแห้ง อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของกรรมวิธีการผลิต คือ

1. การผลิตยางแบบธรรมดา (Conventional rubber process) ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นฝั่แห้ง ยางเครพและยางสกิม

2. การผลิตยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน (Technically specified rubber process) ผลิตโดยมีเงื่อนไข การระบุคุณภาพมาตรฐานสากล ได้แก่ ยางแท่ง

### 2.1.4 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้มีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ใน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบเส้นตรงใน 1 หน่วย ไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และหมู่แอลฟาเมทิลีนที่วงเวทต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเช่นเดียวกัน ดังนั้นการออกสูตรยางจำเป็นจะต้องมีแอนติออกซิแดนท์และแอนตีโอโซนแชนท์ร่วมด้วย ยางธรรมชาติมีสายโซ่ที่เคลื่อนไหวง่ายไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ  $-72^{\circ}C$  สามารถใช้งานได้ ที่อุณหภูมิต่ำมาก สำหรับความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง อยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องมีการบดยาง ก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการบดยางโดยทั่วไปจะใช้เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง

### 2.1.5 การรักษาสภาพน้ำยาง

น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยาง จะคงสภาพความเป็นน้ำยางอยู่ได้ไม่เกิน 6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศ และจากเปลือกของต้นยางขณะกรี๊ดยางจะลงไปใต้น้ำยาง และกินสารอาหารที่อยู่ในน้ำยาง เช่น โปรตีน น้ำตาล ฟอสโฟไลปิด โดยแบคทีเรียจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากแบคทีเรียกินสารอาหาร คือ จะเกิดการย่อยสลายได้เป็นก๊าซชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน เริ่มเกิดการบูดเน่าและส่งกลิ่นเหม็น การที่มีกรี๊ดที่ระเหยง่ายเหล่านี้ในน้ำยางเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่า pH ของน้ำยางเปลี่ยนแปลงลดลง ดังนั้น น้ำยางจึงเกิดการสูญเสียสภาพ ซึ่งสังเกตได้จากน้ำยางจะค่อย ๆ หนืดขึ้น เนื่องจากอนุภาคของยางเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ และจับตัวเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนน้ำยางสูญเสียสภาพโดยน้ำยางจะแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนที่เป็นเซรุ่ม ดังนั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียสภาพของน้ำยางไม่ให้อนุภาคของเม็ดยางเกิดการรวมตัวกันเองตามธรรมชาติ จึงมีการใส่สารเคมีลงไปใต้น้ำยางเพื่อเก็บรักษาน้ำยางให้- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงสภาพเป็นของเหลว โดยสารเคมีที่ใช้ในการเก็บรักษาน้ำยารักษาเรียกว่า สารป้องกันการจับตัว (Anticoagulant) ได้แก่ แอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟด์ โพร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น เพื่อที่รักษาน้ำยาอย่างไม่ให้เสียสูญเสีย

### 2.1.6 สมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อการขีดถู ความเหนียวติดกัน และสมบัติเชิงพลวัต เป็นต้น ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะกับการใช้งานในเชิงวิศวกรรมที่ต้องรับแรงสูง สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ ได้แก่

1. ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง โดยสามารถกลับคืนสู่รูปร่างที่มีขนาดเท่าเดิมหรือขนาดใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว ภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากการที่มีแรงภายนอกมากระทำ

2. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูง เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดการตกลึกเมื่อได้รับแรงดึง เชื่อกันว่าการเกิดผลึกนี้ช่วยให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูงทั้งก่อนและหลังการทำให้คงรูป

3. ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูง เนื่องจากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึงของยางธรรมชาติ โดยผลึกที่เกิดขึ้นนี้จะมี การเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาดทำให้ขัดขวางการฉีกขาดที่เกิดขึ้น

4. สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน และยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) สูงมากอีกด้วย

5. การกระเด็นกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเด็นกระดอนที่สูงมาก และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยางจะมีการสูญเสียพลังงานที่ต่ำ เมื่อถูกใช้ในทางไดนามิกส์ยางธรรมชาติจะมีความร้อนสะสมที่ต่ำด้วย ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะสำหรับการผลิตยางล้อรถที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางล้อรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน

6. ความทนทานต่อการขีดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการขีดถูที่ดี

7. ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติมีความเหนียวติดกันสูง โดยเฉพาะในยางที่ไม่ได้ผ่านการคงรูป สามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ และสิ่งทอ

8. ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก โดยยางธรรมชาติมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง  $1 \times 10^{15}$  ถึง  $2 \times 10^{15}$  โอห์ม/เซนติเมตร

9. ความทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) ยางธรรมชาติไม่สามารถทนทานต่อสารเคมีที่ไม่ใช่ไขมันได้ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม หรือตัวทำละลายที่ไม่ใช่ไขมันต่างๆ เช่น เบนซีน โทลูอินและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฮกเซน เป็นต้น เนื่องจาก โครงสร้างที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของยางธรรมชาติ ทำให้ถูกละลายได้ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่ยางธรรมชาติจะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน และ แอลกอฮอล์

10. สมบัติการเสื่อมสภาพ (Aging property) เนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด ยางธรรมชาติมี ความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ โดยเฉพาะเมื่อมีแสงแดดหรือ ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่าย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยาง ไอโซพรีนสังเคราะห์แล้ว ยางธรรมชาติมีความทนต่อ การเสื่อมสภาพที่มากกว่ายางไอโซพรีนสังเคราะห์ เนื่องจากโปรตีนในยางธรรมชาติ มีความสามารถในการยับยั้งการเสื่อมสภาพได้นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนอีกด้วย ดังนั้น เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพและยืดอายุการใช้งาน จึงนิยมเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ หรือสารป้องกัน การเกิดออกซิเดชันลงในยางธรรมชาติ

11. ความแปรปรวนของยางธรรมชาติ สมบัติของยางธรรมชาตินั้นค่อนข้างจะมีความไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอในองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบอยู่ในน้ำยางซึ่งกำหนดโดยตัวแปรทาง สภาพภูมิอากาศและทางชีวภาพ เช่น ลักษณะของดินที่ใช้ปลูกยาง ฤดูกาล สายพันธุ์ของต้นยาง อายุของต้นยาง ส่วนของต้นยางที่ถูกกรีด ความถี่ในการกรีดต้นยาง เวลาการกรีดยาง เป็นต้น ส่งผลให้ปริมาณขององค์ประกอบที่ไม่ใช่ยางมีความแปรปรวน อีกทั้ง ปรากฏการณ์ การแข็งขึ้นของยางระหว่างการเก็บ (Storage hardening) ทำให้สมบัติของยางมีความแปรปรวนเช่นเดียวกัน

## 2.2 โฟมยางธรรมชาติ [13]

ผลิตภัณฑ์โฟมยางหรือยางฟองน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นรูพรุนเหมาะที่ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก เบาะนั่ง ที่นอน หมอน สื่อการสอน ตุ๊กตา และของชำร่วยต่างๆ เช่น พวงกุญแจ หลักการสำคัญของการผลิตยางฟองน้ำคือการทำให้น้ำยางเกิดฟองของอากาศหรือของแก๊สต่างๆ แล้วทำให้ฟองยางคงรูปหรือการวัลคาไนซ์ด้วยสารเคมีและความร้อน

### 2.2.1 เทคนิคการผลิตยางฟองน้ำ

ในปัจจุบันเทคนิคการผลิตโฟมยางธรรมชาติแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ

#### 1. เทคนิคแบบ Dunlop's process

หลักการ คือ ทำให้น้ำยางเป็นฟอง (foaming) และทำให้ฟองยางเกิดการขึ้นรูป ต่อมาทำให้ฟองยางคงรูป (vulcanizing) จากนั้นชะล้างสารเคมีและสารที่ไม่ใช่ยางออกจากยางฟองน้ำ (foaming) และนำไปอบให้แห้งขั้นตอนการทำยางฟองน้ำโดยวิธี Dunlop

1. เตรียมดิสเพอซัน/อิมัลชัน/สารละลายของสารต่างๆ

2. โล้แอมโมเนียจากน้ำยางจากนั้นก็ทำการเติม K-oleate

3. ทำการเติม foaming agent/Sulphur/accelerator/antioxidant (กรณีการผลิตระดับโรงงาน: จะเติมสารเหล่านี้บางส่วน/บม้น้ำยางคอมปาว์น แล้วจึงเติมสารส่วนที่เหลือ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปั่นน้ำยางให้เป็นฟอง อัตราส่วนของฟองยางจะเป็นตัวกำหนดเนื้อยางฟองน้ำ
5. เติม zinc oxide และ secondary gelling agent
6. เติม gelling agent
7. เทฟองยางลงเข้าพิมพ์ (อลูมิเนียม/ปูนพลาสติกอร์)
8. Vulcanizing
9. แกะยางฟองน้ำออกจากพิมพ์ ล้าง และทำการอบแห้ง

ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ก็คือ เป็นเทคนิคที่ประหยัดพลังงาน (เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม) แต่มีข้อเสีย คือ ได้ฟองยางที่มีระดับความนิ่มของฟองยางไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาของฟองยาง ดังรูปที่แสดงที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โฟมยางธรรมชาติที่ผลิตโดยเทคนิค Dunlop's process [14]

## 2. เทคนิคแบบ Talalay's process

หลักการ คือ ในขั้นตอนการผลิตมีขั้นตอนทางกลเพิ่มขึ้นคือใส่น้ำยางที่ผสมแล้วเข้าแม่พิมพ์เพียงบางส่วนเสร็จแล้วดูดเอาอากาศในแม่พิมพ์ออก น้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้วจะพองตัวขึ้นจนเต็มแม่พิมพ์ จากนั้นแช่แข็งด้วยความเย็น อบด้วยความร้อน นำออกจากแม่พิมพ์ ล้างทำความสะอาดและอบให้แห้ง

ขั้นตอนการทำยางฟองน้ำ โดยวิธี Talalay

1. ผสมน้ำยาง กับ สบู่และสารเคมีสำหรับวัลคาไนซ์
2. ตีน้ำยางให้เป็นฟองในระดับหนึ่ง
3. เทใส่เข้า และ ปิดฝาเข้า
4. ดูดอากาศออกให้ฟองน้ำเต็มเข้า
5. ใช้ความเย็นให้ฟองยางแข็งตัว

6. ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป ให้น้ำยางจับตัว

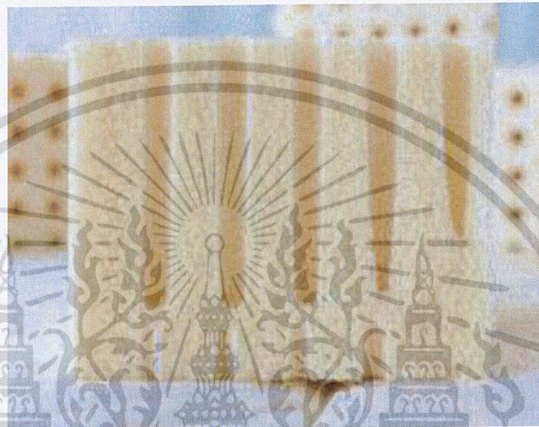
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. อุณหภูมิให้ร้อน ให้พองน้ำสุก วัลคาไนซ์

8. แกะพองน้ำออกจากเบ้า

9. ล้าง และทำการตากให้แห้ง

ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ก็คือ จะได้โฟมยางธรรมชาติที่มีรูพรุนที่เป็นระเบียบ ขนาดรูพรุนเท่าๆ กัน และข้อเสียก็คือ มีขั้นตอนในการทำที่มาก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยาก และใช้พลังงานมากในการผลิต จึงทำให้ไม่เป็นที่นิยม ดังภาพที่แสดงที่ 2.4 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีแบบ Dunlop's process ในการผลิตโฟมยางธรรมชาติ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูปและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย



รูปที่ 2.4 โฟมยางธรรมชาติที่ผลิตโดยเทคนิค Talalay's process [14]

### 2.2.2 น้ียงและสารเคมีต่างๆ [15]

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงไปน้ียง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีจะนำไปใช้งานได้ก็ต่อเมื่อสารเคมีเหล่านี้ได้ทำปฏิกิริยากับยางแล้ว โดยสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanised rubber หรือ Cured rubber)

จุดประสงค์ของการเติมสารเคมีลงไปน้ียงเพื่อทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ได้แก่

1. เพื่อให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น เช่น ในขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมี และการขึ้นรูปยาง เป็นต้น
2. เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตรงตามความต้องการ
3. เพื่อลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากสารเติมแต่งสมบัติยาง (Fillers) บางชนิดมีราคาถูกกว่ายางมาก จึงเติมลงไปเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณ

สารเคมีที่ใช้สำหรับการผลิตวัสดุสำเร็จรูปยางหรือผลิตภัณฑ์ยาง แบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. น้ำยางสด

น้ำยางสดมีเนื้อยางแห้ง 25 – 45 เปอร์เซ็นต์ เฉลี่ยประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ น้ำยางที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง จะใช้น้ำยางชั้น มีเนื้อยางแห้งประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้ำยางชั้นจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอดีกว่าน้ำยางสด น้ำยางชั้นที่นิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์จะมีความเข้มข้นประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ (เนื้อยางแห้ง) ที่ได้จากการปั่น (Centrifuged concentrated latex) หรือจากการทำครีมมิ่ง โดยการเติมสารทำให้น้ำยางเกิดครีมแยกจากส่วนที่เป็นน้ำ และเป็นน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia ; HA) ซึ่งรักษาด้วยแอมโมเนียไม่น้อยกว่า 0.6 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักน้ำยาง

## 2. น้ำยางคงรูป หรือ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Prevulcanised Latex)

น้ำยางคงรูป หรือ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Prevulcanised Latex) คือน้ำยางเข้มข้นที่ได้ผ่านกรรมวิธีการทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยง โดยการให้ความร้อนกับน้ำยางชั้นที่ผสมสารเคมีพวกสารเพิ่มความคงตัว และสารในระบบทำให้น้ำยางคงรูปไว้แล้ว ข้อแตกต่างระหว่างการใช้ยางชั้นปกติกับน้ำยางคงรูป คือ น้ำยางคงรูปได้ผ่านการผสมสารเคมีต่างๆ มาแล้ว และให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปไปแล้ว ดังนั้น ขณะนำไปใช้งาน จึงใช้งานโดยตรง ไม่ต้องผสมสารเคมี ยกเว้นอาจมีการเติมสารมหัศจรรย์ หรือ สารป้องกันยางเสื่อมสภาพเท่านั้น

## 3. สารทำให้น้ำยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซิง (Vulcanizing agent)

เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) ตรงตำแหน่งที่วงเวตต่อปฏิกิริยาเพื่อการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้นปฏิกิริยาที่เกิด เรียกว่า การคงรูป หรือ การวัลคาไนซ์ (Cure หรือ Vulcanisation)

สารทำให้น้ำยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซิง แบ่งได้เป็น 3 พวก คือ

1. กำมะถัน (Sulfur, S) และธาตุที่คล้ายกำมะถัน กำมะถันนิยมใช้มากที่สุดประมาณ 90% ส่วนซีลีเนียม (Selenium) และ เทลลูเรียม (Tellurium) สามารถใช้แทนกำมะถันได้แต่ปฏิกิริยาที่ทำกับยางไม่ดี เท่ากับกำมะถันและยังเป็นพิษอีกด้วย

2. สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor) หมายถึง สารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และสลายให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการคงรูป ได้แก่ ทีเอ็มทีดี (Tetramethyl thiuram disulphide; TMTD) ดีทีดีเอ็ม (Dimorpholine disulphide หรือ Dithiodimorpholine; DTDM) ดีพีทีที (Dipentamethylene thiuram tetrasulphide; DPTT)

3. สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน เช่น โลหะออกไซด์ (Metallic oxides) ได้แก่ พวงซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide; PbO) และสารเพอรอกไซด์ (Peroxide) ได้แก่ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) เบนซิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide)

## 4. สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (Vulcanization accelerators)

เป็นสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการคงรูปหรือปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางให้เกิดเร็วขึ้น นอกจากนั้น ยังช่วยลดการใช้กำมะถันให้น้อยลงและให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอยิ่งขึ้น สารเร่งที่ดีจะสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ยางคงรูปได้เร็ว มีความว่องไวในการเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง ละลายได้ดีในยาง มีความปลอดภัยในกระบวนการผลิต สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อม ใช้งานได้ช่วงอุณหภูมิกว้าง เข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่นๆ ที่ใส่เข้าไปในยาง และไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ สารเร่งจัดเป็นกลุ่มตาม ลักษณะโครงสร้างทางเคมี ได้ 7 ประเภทคือ

1. กลุ่มกัวนิดีน (Guanidine) ได้แก่
  - ดีพีจี (Diphenyl guanidine; DPG), ดีโอทีจี (Di-o-tolyl guanidine; DOTG)
2. กลุ่มอัลดีไฮด์อะมีน (Aldehyde amine) ได้แก่
  - บีเอ (Butyraldehyde aniline; BA) เฮกซ์เอมีน (Hexamethylene tetramine; HMT)
3. กลุ่มซัลฟีนามิค (Sulphenamide) ได้แก่
  - ซีบีเอส (N-cyclohexyl-2-benzthiazyl sulphenamide; CBS)
  - ทีบีบีเอส (N-tert-butyl-2-benzthiazyl sulphenamide; TBBS)
4. กลุ่มไธอาโซล (Thiazole) ได้แก่
  - เอ็มบีที (2-mercaptobenzthiazole; MBT), เอ็มบีทีเอส (2,2' dibenzthiazyl disulphide; MBTS)
  - แซดเอ็มบีที (Zinc-2-mercaptobenzthiazole; ZMBT)
5. กลุ่มไธยูเรม (Thiuram) ได้แก่
  - ทีเอ็มทีเอ็ม (Tetramethyl thiuram monosulphide; TMTM)
  - ทีเอ็มที หรือ ทีเอ็มทีดี (Tetramethyl thiuram disulphide; TMT หรือ TMTD)
  - ทีอีที หรือ ทีอีทีดี (Tetraethyl thiuram disulphide; TET หรือ TETD)
6. กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate) ได้แก่
  - แอมโมเนียมไดไธโอคาร์บาเมต (Ammonium dithiocarbamate) โซเดียมไดไธโอคาร์บาเมต (Sodium dithiocarbamate) ซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต (Zinc dithiocarbamate)
7. กลุ่มแซนเทท (Xanthate) เป็นสารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็วมาก นิยมใช้ในน้ำยาง

#### 5. สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป (Accelerator activators)

เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น จะไปเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น โดยทำให้ยางมีโมดูลัส (Modulus) สูงขึ้น สารกระตุ้นมี 2 ประเภท คือ

1. พวกอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesiumoxide ; MgO)
2. พวกอินทรีย์ ที่สำคัญคือ กรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid), กรดลอริก (Lauric acid) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. สารตัวเติม (Fillers)

หมายถึง สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น หรือเพื่อลดต้นทุนในการผลิต ลดความหนืดตัวของยางดิบ และยังใช้เพื่อการเพิ่มความแข็งแรงให้ยาง

สารตัวเติมแบ่งตามหน้าที่ได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง (Reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางแล้วช่วย ให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความต้านทานต่อแรงดึงต่อการสึกหรอ และต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น สารพวกนี้ ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica)

2. สารตัวเติมพวกกึ่งเสริมความแข็งแรง (Semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมประเภทที่ใส่เข้าไปในยางแล้ว ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยางบ้าง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum silicate) แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) คาโอลิน (Kaolin)

3. สารตัวเติมพวกช่วยลดต้นทุนการผลิต (Extending filler) เป็นสารที่ใส่ลงไปเพื่อจุดประสงค์ในการลดต้นทุนแต่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย โดยทำให้สมบัติแรงดึงขาดลดลง และสมบัติเชิงกลอื่นๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้กระบวนการผลิตยากหรือง่ายขึ้น สารพวกนี้ ได้แก่ ไชนาเคลย์ (China clays) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) แบไรท์ (Barytes) และ แป้งทัลคัม (Talcum)

## 7) สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agent)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้นไปจากเดิม จึงจำเป็นต้องมีสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) หรือสารแอนตีโอโซนแนนท์ (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิด จะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวขึ้น สารแอนติออกซิแดนท์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องมาจากการที่ออกซิเจน (Oxygen,  $O_2$ ) เข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ได้แก่สารประกอบอะมีน (Amine) หรืออนุพันธ์ของอะมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีคล้ำ เปลี่ยนสี หรือตกสี นิยมใช้กับยางที่มีสีดำ เช่น อัลคิเลทเต็ด ไดฟานิลเอมีน (Alkylated diphenylamines) อัลคิเลทเต็ด พาราไดฟานิลเอมีน (Alkylated p-phenylenediamines) และสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล (Substituted phenols) ใช้กับยางสีทั่วไปที่ไม่ใช่สีดำ ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางตกสี และไม่เปลี่ยนสียาง เช่น อนุพันธ์ของฟีนอล, บิสฟีนอล (Bisphenol)

สารแอนตีโอโซนแนนท์ (Antiozonant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากโอโซน (Ozone,  $O_3$ ) ได้แก่ พาราฟีนิลีนไดเอมีน (Para-phenylen diamine) และขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8) สารพวกอื่นๆ

สารพวกอื่นๆ นี้ ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในยางเมื่อมี ความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) สารหน่วงปฏิกิริยายางคงรูป (Retarder) เป็นต้น

**8.1 สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material)** สีที่ใส่ลงไปในยางควรเป็นสีที่มีประสิทธิภาพทนทานต่อแสง ทนทานต่อความร้อน ไม่ตกสี ไม่เป็นพิษ มีราคาถูก ไม่มีผลต่ออายุของยางและอัตราความเร็วในการทำให้ยางคงรูป แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. สีอินทรีย์ เป็นสีที่สังเคราะห์ขึ้น และเป็นสีค่อนข้างมีประสิทธิภาพดี ให้สีที่เห็นชัด สีสดสวย แต่มีราคาแพง สีอินทรีย์บางตัวจะเปลี่ยนสีหรือสีจางลงได้ง่าย ถ้าถูกแสงนาน ๆ หรือถูกสารเคมี และสีไม่ทนทานต่อการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง สีอินทรีย์นี้เมื่อนำไปใช้อาจจะใช้ในรูปของผง หรือในรูปของส่วนผสมของยางกับสารเคมี (Masterbatch)

2. สีอนินทรีย์ เป็นสีที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าพวกสีอินทรีย์ ราคาค่อนข้างถูก แต่ต้องใช้ปริมาณมาก สีค่อนข้างทึบไม่ใส แต่มีความคงตัวอยู่นาน สีมักไม่จาง และยังทนได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ตัวอย่างสารอนินทรีย์ เช่น สีขาวใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $TiO_2$ ) สีแดงใช้ เหล็กออกไซด์ (Iron oxide) สีน้ำเงินใช้ อัลตรามารินบลู (Ultramarine blue) สีเขียวค่อนข้างทึบใช้ โครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide)

**8.2 สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents)** เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในยางและช่วยให้เกิดรูพรุนในยาง โดยโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดฟองจะแตก สลายเมื่อได้รับความร้อน และให้แก๊สออกมาทำให้ยางเป็นรูพรุนในรูปแบบของฟองน้ำ (Sponge) หรือ ยางไมโครเซลลูลาร์ (Microcellular rubber) สารทำให้เกิดฟองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดอนินทรีย์ มีประสิทธิภาพต่ำ ต้องใช้ปริมาณมาก การกระจายตัวไม่ดี ราคาค่อนข้างถูก สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้ คือ แอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate) โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate) สารเคมีเหล่านี้จะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )

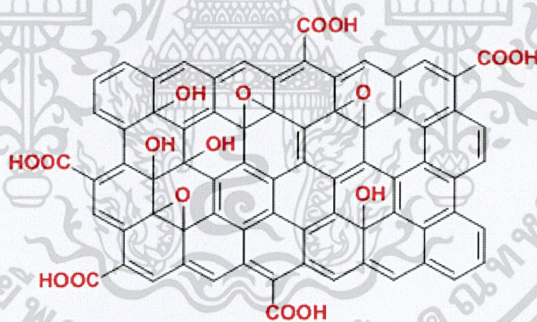
2. ชนิดอินทรีย์ เป็นสารที่ให้แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถละลายในยางได้ดี การกระจายตัวดี ทำให้เกิดฟองขนาดเล็กและสม่ำเสมอ มีราคาค่อนข้างแพง ได้แก่ สารพวก อะโซคอมปาวด์ (Azocompounds) ไนโตรโซคอมปาวด์ (Nitroso compound) ซัลโฟนิลไฮไดรราไซด์ (Sulfonyl hydrazide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) [16]

กราฟีน ซึ่งเป็นหนึ่งในอัญรูปของคาร์บอนที่มีการค้นพบในปี ค.ศ. 2004 โดย ศาสตราจารย์ ดร. อังเดร ไกม์ (Andre Geim) และ ศาสตราจารย์ ดร. คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ สหราชอาณาจักร ซึ่งผลงานการค้นพบแกรฟีน ทำให้ทั้งสองท่านได้รับ รางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 2010 ซึ่งการค้นพบได้เริ่มต้นจากการแยกชั้นแกรฟีนจากแกรไฟต์สามารถทำได้โดยเทคนิค micromechanical cleavage หรือ การเอาสก็อตเทป ทาบลงบนแกรไฟต์แล้วดึงออกจากนั้นก็นำไปทาบลงบน สก็อตเทปอีกครั้งแล้วดึงออกใน แต่ละครั้งที่ดึงออกก็จะบางลงเรื่อยๆ จนกระทั่งได้แผ่นที่บางที่สุดแค่อะตอมเดียวเท่านั้น

กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide ; GO) เป็นวัสดุสองมิติที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน จัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในแลตทิซแบบหกเหลี่ยม ลักษณะคล้ายรังผึ้ง และมีไฮบริดเซชัน (Hybridization) แบบ  $sp^2$  มีความหนาเพียง 1 อะตอมของคาร์บอน หรืออาจกล่าวได้เป็นชั้นเดียวของกราไฟต์ หรือประมาณ 0.335 nm ดังภาพที่ 2.5 และเป็นอัญรูปหนึ่งของสารประกอบคาร์บอน ด้วยลักษณะโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ (GO) เช่นนี้ จึงทำให้กราฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงกว่าเพชร และแข็งแรงกว่าเหล็กกล้าถึง 200 เท่า ขณะเดียวกันกราฟีนออกไซด์ยังเป็นฉนวนนำความร้อนที่ดี และยังมีสมบัติด้านอื่นๆ ที่ดีเยี่ยมอีกด้วย เช่น สมบัติเชิงกล หรือสมบัติความโปร่งแสง เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกต่างให้ความสนใจต่อกราฟีนออกไซด์ (GO) ในการนำมาประยุกต์และพัฒนาเพื่อผลิตวัสดุชนิดใหม่ๆ ที่สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ (GO)

### 2.3.1 คุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์ [17]

1. ความแข็งแรง กราฟีนออกไซด์มีค่าระดับความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กถึง 5 เท่า (เทียบเท่าหรือมากกว่าเพชร) เบากว่า เหนียวกว่า และยืดหยุ่นกว่า แต่แม้จะแข็งแรงแต่แผ่นกราฟีนออกไซด์กลับสามารถ บิดงอ ม้วน หรือพับ ได้อย่างง่ายดายโดยไม่ทำให้โมเลกุลเสียหายทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่รีไซเคิลได้ดีต่อสภาพแวดล้อม

2. ความโปร่งแสง สามารถมองเห็นได้ (แม้ว่ามีความบางขนาดอะตอมก็ตาม) ขณะที่ตัวกราฟีนออกไซด์เองก็โปร่งแสง ดูดกลืนแสงเพียงร้อยละสองถึงสามเท่านั้น กราฟีนจึงเหมาะกับการใช้เป็นแผงโซลาร์เซลล์ กราฟีนชั้นเดียวสามารถมองเห็นได้โดยมีค่าการดูดซับแสงอยู่ที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

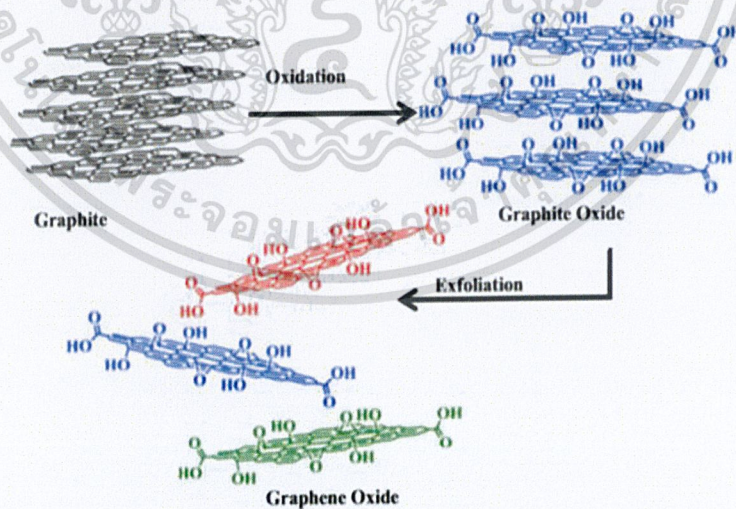
3. ความยืดหยุ่น แกรฟีนออกไซด์มีความยืดหยุ่นสูง ยืดได้ร้อยละ 20 ของความยาว อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่บางที่สุดเท่าที่มีการค้นพบ แม้ว่าในทางทฤษฎีจะไม่สามารถวัดความหนาของอะตอมได้แต่สามารถวัดระยะห่างระหว่างอะตอมได้ ทำให้สามารถประเมินคร่าว ๆ ได้ว่าแผ่นกราฟีนออกไซด์หนาประมาณ 0.335 นาโนเมตร

4. ความทึบ แกรฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่ทึบมากที่สุด จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวตรวจจับก๊าซ ความไวสูง เพราะแม้ปริมาณก๊าซน้อยมาก ๆ ก็ถูกจับไว้ในแลตติสของแกรฟีน

5. ไม่นำไฟฟ้า และเป็นฉนวนนำความร้อน

### 2.3.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ [18]

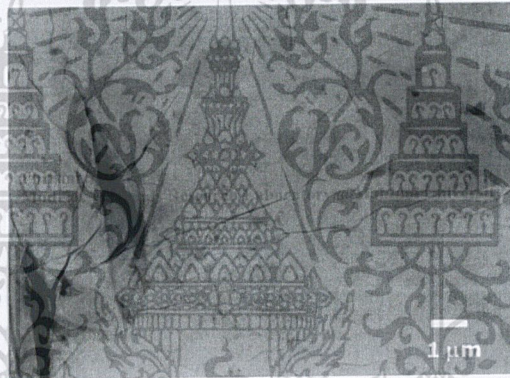
กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เป็นกราฟีนที่มีการดัดแปลงทางเคมี (chemical modified graphene) เตรียมได้จากกระบวนการปฏิกิริยาออกซิเดชันของกราฟไฟต์ และลอกเป็นชั้นเดียวของกราฟีนซึ่งสัดส่วนของปริมาณอะตอมของคาร์บอนต่อออกซิเจน (C:O) น้อยกว่า 3.0 และสัดส่วนที่ดีที่สุดมีค่าใกล้เคียง 2.0 ซึ่งหลักการในการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีทางเคมี เริ่มต้นด้วยการใช้กรดแก่หรือตัวออกซิ-แดนท์มาออกซิไดส์แกรไฟต์ได้เป็น “กราฟไฟต์ออกไซด์” ซึ่งกลุ่มของออกไซด์ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิลิกและคาร์บอนิลจะเข้าไปแทรกและเกาะเต็มระนาบพื้นผิวในแต่ละชั้นของกราฟไฟต์ ทำให้แต่ละชั้นของ กราไฟต์กว้างขึ้นและลดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้น หากกราฟไฟต์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแรงเพียงที่มากพอ เช่น ด้วยการใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) ก็สามารถหลุดลอกออกเป็น “กราฟีนออกไซด์” (Graphene oxide) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติแล้วการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์มีอยู่ 3 วิธีหลักๆ ได้แก่ วิธีของ Hummer และ Offman Staudenmaier และ Brodie แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดก็คือวิธีการทางเคมีโดย Hummer's method ซึ่งวิธีนี้ใช้  $\text{Conc. H}_2\text{SO}_4$  และ  $\text{KMnO}_4$  เป็นตัวออกซิไดส์ Graphite flakes ที่มีความบริสุทธิ์สูง มี Localized defects ใน p-structure จึงเป็นตัวเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลให้หมู่ออกไซด์แทรกระหว่างชั้นของแกรไฟต์หรือบนผิวของแกรไฟต์ โดยเฉพาะกลุ่ม 1,2 epoxides และ hydroxyl ส่วนบริเวณขอบจะมีกลุ่มของ carboxyl และ hydroxyl เกาะเป็นส่วนใหญ่ และอาจมี 5 และ 6 membered lactols ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าระยะห่างระหว่างผลึก (d-spacing) มีค่าสูงขึ้น จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของแกรไฟต์ (van der waal force) มีค่าลดลง ทำให้เกิดเป็น “แกรไฟต์-ออกไซด์” ซึ่งแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จะมีสีน้ำตาลเข้มอยู่ในรูปของสารแขวนลอย และสามารถนำมารองได้ทันทีหลังจากทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน หากนำสารแขวนลอยดังกล่าวมาทำการกระตุ้นด้วยด้วยการใช้คลื่นความถี่สูง (sonication) ก็จะสามารถหลุดออกเป็นสารแขวนลอย กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)



รูปที่ 2.7 ภาพ TEM แสดงชั้นบางๆ ของกราฟีนออกไซด์ [18]

## 2.4 อนุภาคซิลเวอร์นาโน (Silver nanoparticles)

คือ เทคโนโลยีการสังเคราะห์เงินหรือซิลเวอร์ (Silver) ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (Nanometer) คือ มีขนาดไม่เกิน 100 นาโนเมตร เทียบเท่ากับดีเอ็นเอในร่างกายของมนุษย์ และเนื่องจากขนาดที่เล็กนี้เอง ทำให้มีปริมาณพื้นที่ผิวสูง ซึ่งสามารถสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น โลหะเงินสามารถแตกตัวเป็นประจุบวก ( $\text{Ag}^+$ ) ในระดับอนุภาคนาโน จากนั้น อนุภาคซิลเวอร์จะไปเกาะที่ผนังของเชื้อแบคทีเรีย และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ พร้อมกับเข้าจับกับหมู่ซัลเฟต (Sulphate) ของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เผาผลาญออกซิเจน และพลังงาน ทำให้เอนไซม์ และการเผาผลาญพลังงาน เกิดผิดปกติ จนแบคทีเรียถูกทำลาย และตายในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน [20]

การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจะมีด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ (Physical approach) ได้แก่ วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) และวิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave) วิธีที่สองจะเป็นวิธีทางเคมี (Chemical approach) ได้แก่ วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) และวิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical synthesis) ซึ่งในแต่ละวิธีการสังเคราะห์จะได้รูปร่างและขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ อีกด้วย รูปร่างที่พบบ่อยได้แก่ รูปทรงกลม รูปทรงสี่เหลี่ยม และพีระมิด เป็นต้น

##### 2.4.1.1 วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนโดยการยิงด้วยเลเซอร์ของสารที่เป็นโลหะในสารละลาย คุณลักษณะเฉพาะของรูปแบบอนุภาคโลหะและการยิงที่มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่กระทบกับโลหะเป้าหมาย ระยะเวลาพัลส์ของเลเซอร์ ระยะเวลาการยิงและผลกระทบจากของเหลวที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิว ฟลูเอนซ์ของเลเซอร์เป็นหนึ่งตัวแปรที่สำคัญที่สุด โดยอนุภาคโลหะที่ออกมาจากเป้าหมายต้องใช้พลังงานต่ำที่สุด ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนที่พบโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อฟลูเอนซ์ของเลเซอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ฟลูเอนซ์ของเลเซอร์แล้วจำนวนภาพเลเซอร์ เช่น เวลาที่ใช้ในระหว่างการกลายเป็นไอเลเซอร์ มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นและสัณฐานวิทยาของอนุภาคโลหะที่ปล่อยออกมาในของเหลว ความเข้มข้นของอนุภาคโลหะภายใต้แสงเลเซอร์คาดว่า จะเพิ่มขึ้น แต่สามารถทำให้อิ่มตัวได้เนื่องจากการดูดกลืนแสงในคอลลอยด์ที่มีความเข้มข้นสูงในอนุภาคโลหะ ซึ่งจากงานวิจัยของทาเคชิ ชูจิและคณะ ได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการยิงด้วยเลเซอร์ในสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ในการสังเคราะห์จะนำแผ่นซิลเวอร์ใส่ลงในเซลล์ควอตซ์ จากนั้นเติมสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน และทำการยิงเลเซอร์เข้าไปที่แผ่นซิลเวอร์ โดยอนุภาคเงินระดับนาโนจะตกลงไปในสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน แหล่งกำเนิดที่ใช้คือ Nd:YAG และใช้ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ 355 นาโนเมตร ระยะเวลาในการปล่อยเลเซอร์คือ 10 นาที่ ผลที่ได้พบว่า อนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโนที่ได้มีขนาดเล็กกว่า 5 นาโนเมตร ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการเกิดอนุภาคเพิ่มมากขึ้น

##### 2.4.1.2 วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave) [21]

การสังเคราะห์โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีที่ง่าย ข้อดีของวิธีการสังเคราะห์โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟ คือสามารถทำให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาค่อนข้างสั้นในการสังเคราะห์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีความบริสุทธิ์ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการสังเคราะห์ก็คือในปิกเกอร์ที่ 1 ซึ่งโพลีไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone ; PVP) 0.3 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร จากนั้นปิกเกอร์ที่ 2 ทำการชั่งซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate ; AgNO<sub>3</sub>) 0.3 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร นำสารทั้งสองชนิดมาปั่นจนผสมกันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำเข้าไมโครเวฟ 300 วัตต์ นำออกมาจากเครื่องไมโครเวฟทุกๆ 15 วินาที คั้นเพื่อลดการเดือด จนครบ 210 วินาที

เอกสาร...  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารจะเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าเกิดเป็นอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนในลักษณะคอลลอยด์แล้ว

#### 2.4.1.3 วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction)

วิธีรีดักชันทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ใช้สารเคมีน้อย และสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคของเงินระดับนาโนได้ ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับเกิดรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรต โดยการใช้ตัวรีดิวซ์เป็นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และตัวรักษาเสถียรภาพ เป็นไตรโซเดียมซิเตรท ไดไฮเดรต โดยมีปัจจัยในการป้องกันการเกิดรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน ซึ่งวิธีนี้มีตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาค และการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน หลายตัวแปร เช่น ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้นของตัวรักษาเสถียรภาพ และปริมาณของตัวรีดิวซ์ ซึ่งงานวิจัยของฮวงจู่ วั่งและคณะ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี เกิดการรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรตในสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) โดยมีกลูโคส และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยขั้นตอนการสังเคราะห์คือ จะแบ่งสารละลายออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งจะเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตโดยละลายในน้ำปราศจากไอออน และส่วนที่สองจะเตรียมสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) โดยละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) กลูโคส และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำสารในส่วนที่สองไปให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำสารละลายที่สังเคราะห์ได้ลงไปทิ้งที่ละเหย หลังจากเติมลงไปหมดแล้วให้ปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จะพบว่าขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนอยู่ในช่วง 20 ถึง 80 นาโนเมตร และค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 420 นาโนเมตร และในงานวิจัยยังพบว่า โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความคงตัวของคอลลอยด์ของอนุภาคเงินในระดับนาโน และยังช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโนอีกด้วย

#### 2.4.1.4 วิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical synthesis)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยวิธีเชิงแสงทางเคมี จะอาศัยการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ เช่น หลอดโซเดียม หลอดซีนอน และจากรังสียูวี เป็นต้น วิธีการสังเคราะห์เชิงแสงเป็นอีกวิธีที่ง่าย และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้เชิงแสงได้ โดยขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการฉายแสง ซึ่งจากงานวิจัยของสเตฟราน ที่ ดูเบสและวิลลวธรณ พิมพ์พันธุ์ได้ทำการทดลองสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยวิธีเชิงแสงทางเคมี โดยจะเกิดการรีดักชันของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตภายใต้การฉายรังสียูวี โดยจะใช้โพลีเมทาอะคริลิก (PMA) เป็นตัวรีดิวซ์ และตัวรักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินระดับนาโนซึ่งจะอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตและอาศัยผลจากความเกะกะของหมู่ฟังก์ชัน และเมื่อนำไปฉายรังสียูวีได้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลของสีที่เกิดขึ้นจะได้สารละลายสีม่วง ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และภาพที่ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

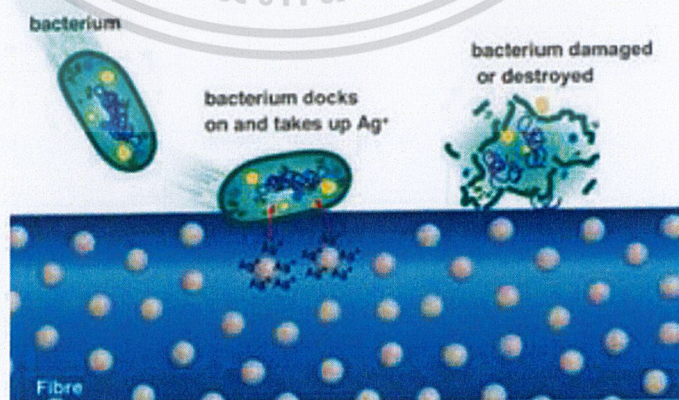
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะแสดงให้เห็นขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 10 นาโนเมตร และจากงานวิจัยพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการฉายรังสีมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น

## 2.4.2 กลไกการทำงานของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

กลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโนก็คือ Silver Ion ( $\text{Ag}^+$ ) จับกับโปรตีนที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่หมู่ thiol ( $-\text{SH}$ ) (เนื่องจาก Silver ion ( $\text{Ag}^+$ ) เป็น Soft base จึงสามารถจับกับ Soft acid เช่น กำมะถัน (S) และฟอสฟอรัส (P) ได้ดี) Silver Ion ( $\text{Ag}^+$ ) ทำให้โปรตีนแปลงสภาพ (Denature) ส่งผลให้การควบคุมการขนส่งสารเข้าและออกจากเซลล์ผิดปกติ Silver Ion ( $\text{Ag}^+$ ) จึงสามารถแทรกเข้าสู่ภายในเซลล์ได้ Silver Ion ( $\text{Ag}^+$ ) ที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์ทำให้ดีเอ็นเอภายในเซลล์ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสจำนวนมากเกิดการรวมตัวและสูญเสียความสามารถในการเพิ่มจำนวน (Replication) แบคทีเรียจึงไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ และ Silver Ion ( $\text{Ag}^+$ ) ที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์ยังสามารถจับกับโปรตีนที่สำคัญอื่นๆ อีก เช่น โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหายใจระดับเซลล์ เมื่อโปรตีนเหล่านั้นไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ แบคทีเรียก็จะตาย นอกจากนี้การขนส่งสารเข้าออกเซลล์ที่ผิดปกตินี้จะทำให้เซลล์แตก ทำให้แบคทีเรียตายในที่สุด กลไกการทำงานของ Silver Ion ( $\text{Ag}^+$ ) ข้างต้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบคทีเรียแกรมลบมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวก เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีชั้น Peptidoglycan ที่บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวก ดังนั้นกลไกการทำงานของอนุภาคซิลเวอร์นาโน มี 3 ตามขั้นตอนดังนี้

1. อนุภาคซิลเวอร์นาโนในช่วง 1 – 10 นาโนเมตร จับกับผิวหน้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียและรบกวนการทำงานระดับเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น การขนส่งสารเข้าออกจากเซลล์และการหายใจ
2. อนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถแทรกเข้าไปภายในเซลล์แบคทีเรียและรบกวนการทำงานระดับโมเลกุล โดยจับกับสารที่มีซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) เป็นองค์ประกอบ เช่น DNA
3. อนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการสลายตัวและปลดปล่อย Silver ion ( $\text{Ag}^+$ ) เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีขนาดเล็กและมีเป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถปลดปล่อย Silver ion ( $\text{Ag}^+$ ) ออกมาด้วยความเข้มข้นสูง สามารถฆ่าแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว

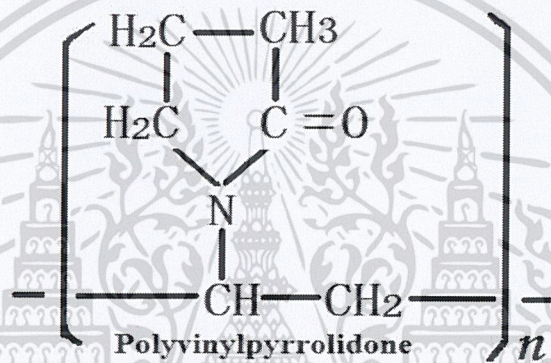


รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโน [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 พอลิไวนิลไพโรลิโดน [23]

พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP) เป็นโพลิเมอร์ในกลุ่มของ vinylpyrrolidone ซึ่งเป็นสารในกลุ่มพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำและตัวทำละลาย พอลิไวนิลไพโรลิโดนมีสูตรทางเคมี คือ  $(C_6H_9NO)_n$  โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นผงสีขาวถึงสีเหลืองอ่อน มีขนาดมวลโมเลกุลอยู่ที่ประมาณ 8,000 – 10,000 กรัมต่อโมล โครงสร้างภายในเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์ (Amide) คุณสมบัติที่โดดเด่นของพอลิไวนิลไพโรลิโดนก็คือ มีส่วนทั้งที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำภายในโมเลกุลเดียวกัน เนื่องจากพอลิไวนิลมีความเป็นพิษที่ต่ำ จึงทำให้พอลิไวนิลไพโรลิโดนถูกนำมาใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น ในด้านการแพทย์ นำมาใช้ในการขยายปริมาตรของพลาสมา หรือมีการนำพอลิไวนิลไพโรลิโดนมาเป็นส่วนผสมในน้ำยาทำความสะอาด นอกจากนี้ในการทดลองยังมีการนำเอาพอลิไวนิลไพโรลิโดนมาเป็นตัวรักษาเสถียรภาพในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์อีกด้วย



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของพอลิไวนิลไพโรลิโดน [23]

## 2.6 แบคทีเรีย [24]

แบคทีเรีย (Bacteria) เป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น (Microorganism) มีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม แบคทีเรียบางชนิดสามารถทำให้เกิดโรคในมนุษย์ได้ ในขณะเดียวกันก็มีแบคทีเรียบางชนิดที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์เป็นอย่างมาก แบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถอยู่เป็นอิสระนอกในร่างกายมนุษย์ได้ มีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่จำเป็นต้องอาศัยอยู่ในเซลล์ของมนุษย์เพื่อการดำรงชีวิต

### 2.6.1 โครงสร้างของแบคทีเรีย

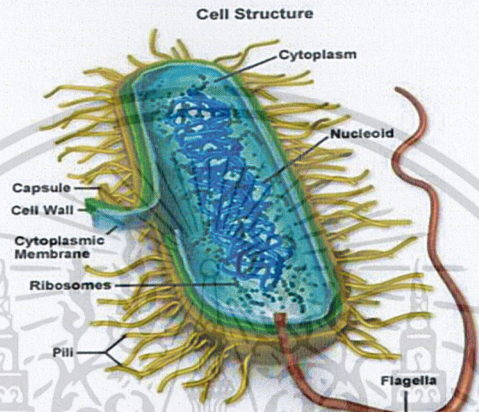
แบคทีเรียเป็นจุลชีพเซลล์เดียวที่มีส่วนประกอบเช่นเดียวกับเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอื่นทั่วไป โดยมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

1. ส่วนผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์จะเป็นผนังที่อยู่ชั้นนอกสุด มีความแข็งแรงและเปรียบเสมือนโครงกระดูกของแบคทีเรีย มีหน้าที่รักษาลักษณะและรูปร่างของแบคทีเรียเอาไว้ให้คงที่ ถัดจากผนังเซลล์เข้าไปจะเป็นเยื่อหุ้มบางๆ เรียกว่า เยื่อหุ้มเซลล์ ทำหน้าที่ควบคุมการแลกเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารอาหารต่างๆ และน้ำที่อยู่ภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ของแบคทีเรีย ให้มีความเหมาะสมในการดำรงชีวิต

2. ส่วนไซโทพลาสซึม เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไป ภายในไซโทพลาสซึมประกอบด้วยโปรตีน สารอาหารต่าง ๆ เช่น แป้ง ไขมัน และเอนไซม์ต่างๆ ที่ใช้ในการดำรงชีวิต นอกจากนี้ยังมีกรดนิวคลีอิกหรือดีเอ็นเอ ซึ่งบรรจุรหัสพันธุกรรมสำหรับควบคุมการดำรงชีวิตและการสืบพันธุ์ของแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์ได้ด้วยแบคทีเรียบางสายพันธุ์มีความสามารถในการสร้างผนังเซลล์ที่มีความหนากว่าปกติล้อมรอบตัว เราเรียกผนังที่หนาเป็นพิเศษนี้ว่า สปอร์ หรือ แคปซูล สปอร์จะทนความร้อน ความเย็น ความชื้น และมีชีวิตอยู่ได้นานหลายปี แม้ว่าจะไม่มีอาหารเลยก็ตาม



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของแบคทีเรีย [25]

### 2.6.2 ประเภทของแบคทีเรีย

แบคทีเรียแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

2.6.2.1 แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ เป็นการแบ่งแบคทีเรียออกเป็นแกรมบวกและแกรมลบ มาจากนำสีแกรมซึ่งเป็นสีน้ำชนิดหนึ่งหยดลงไปบนแบคทีเรีย จะทำให้ผนังเซลล์ของแบคทีเรียมีสีแตกต่างกัน ดังนี้

1. แบคทีเรียที่ผนังเซลล์ติดสีแดง เราจะจัดเป็นแบคทีเรียประเภทแกรมลบ
2. แบคทีเรียที่ผนังเซลล์ติดสีน้ำเงิน เราจะจัดเป็นแบคทีเรียประเภทแกรมบวก

2.6.2.2 แบคทีเรียที่เป็นรูปร่างแท่ง และบิดเป็นเกลียว เป็นการแบ่งประเภทของแบคทีเรียตามลักษณะรูปร่าง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. แบคทีเรียที่มีรูปร่างกลม หรือเรียกว่า คอคคัส หรือ คอคโค แบคทีเรียชนิดนี้มีรูปร่างกลมและอาจเกาะเป็นกลุ่ม เช่น สแตปิโลคอคคัส (Staphylococcus spp.) หรือกลมและต่อกันเป็นสาย เช่น สเตรปโตคอคคัส (Streptococcus spp.) เป็นต้น
2. แบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นแท่ง เป็นแบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวและหนา เรียงตัวกันเป็นเส้นตรงยาว เรียกว่า รอด หรือ บาซิลไล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นเกลียว เป็นแบคทีเรียบางชนิดมีรูปร่างเป็นเส้นยาว หนา และบิดเป็นเกลียว เรียกว่า สไปโรคิต

2.6.2.3 แบคทีเรียกลุ่มแอโรบัส แอนแอโรบัสและฟาคัลเททีฟ เป็นการแบ่งแบคทีเรียโดยใช้เกณฑ์เรื่องการใช้อากาศหรือไม่ใช้อากาศในการดำรงชีวิต โดยเราจะแบ่งแบคทีเรียได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. แบคทีเรียพวกแอโรบัส แบคทีเรียชนิดนี้ต้องใช้อากาศในการเผาผลาญอาหารให้เป็นพลังงานเพื่อใช้ในการดำรงชีวิต ซึ่งถ้ามันอยู่ในสภาพไม่มีอากาศ ก็จะตายหรือไม่เจริญเติบโต แบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นพวกแอโรบัสแบคทีเรียนั่นเอง

2. แบคทีเรียพวกแอนแอโรบัส แบคทีเรียชนิดนี้มีชีวิตอยู่ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีอากาศ และจะตายในเวลาไม่นานถ้าถูกอากาศ พวกมันอาศัยอยู่ในช่องท้อง ในปาก หรือในร่างกาย ตามบริเวณที่มีออกซิเจนน้อย หรือที่อับทึบต่างๆ และเป็นปัญหามากในด้านโรคติดเชื้อ เพราะเป็นแบคทีเรียที่มีการเจริญเติบโตเร็วมาก และยาต้านจุลชีพส่วนใหญ่มักจะไม่ค่อยมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มนี้

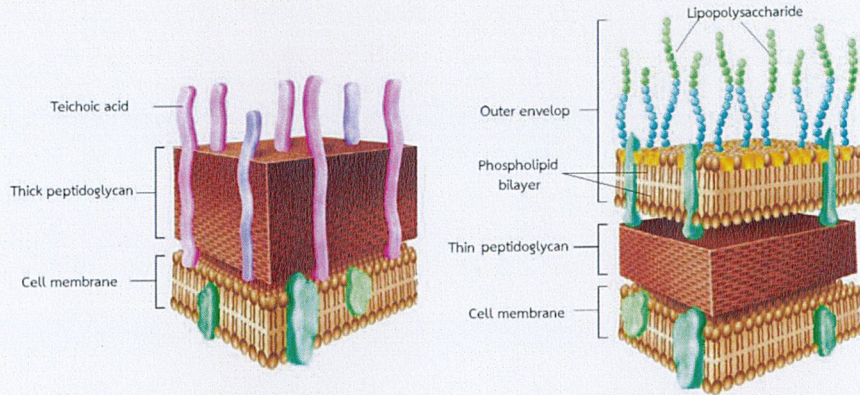
3. แบคทีเรียพวกฟาคัลเททีฟ เป็นแบคทีเรียที่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีอากาศและในสภาพที่ไม่มีอากาศ ตัวอย่างเช่น *Escherichia coli* หรือ เรียกกันว่า อีโคไล (*E. coli*) เป็นแบคทีเรียที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์

### 2.6.3 ความแตกต่างระหว่างเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ [25]

ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย (cell wall) เป็นโครงสร้างที่พบในแบคทีเรียทุกชนิด มีลักษณะเป็นชั้นอยู่ติดและล้อมรอบเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ช่วยห่อหุ้มเซลล์ให้แข็งแรง รักษาความดันภายในเซลล์และป้องกันแรงกลจากภายนอก มีบทบาทในกระบวนการสังเคราะห์สารต่างๆ และการแบ่งเซลล์แบบทวิภาค (binary fission) มีส่วนประกอบหลักคือ เพปทิโดไกลแคน (peptidoglycan) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ N-acetyl glucosamine ที่เป็นองค์ประกอบของไคติน (chitin) พบในผนังเซลล์ของราและโครงสร้างภายนอกของแมลง ต่อสลับกันกับ N-acetyl muramic acid ซึ่งเป็น amino sugar ที่พบเฉพาะในผนังเซลล์ของแบคทีเรียเท่านั้น

การย้อมแกรม (gram staining) เป็นเทคนิคที่ใช้แบ่งแบคทีเรียออกเป็น 2 กลุ่มคือ แบคทีเรียแกรมบวก (gram positive bacteria) และแบคทีเรียแกรมลบ (gram negative bacteria) ผนังเซลล์ของแบคทีเรียส่วนใหญ่ประกอบด้วยเรียกว่าเพปทิโดไกลแคน (peptidoglycan) หรือมิวรีน (murein) มิวโคเพปไทด์ (mucopeptide) หรือมิวโคคอมเพลกซ์ (mucocomplex)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก

ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบ

รูปภาพที่ 2.11 แสดงความแตกต่างระหว่างผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ [25]

ในแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบบื้องต้นประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์ที่ต่างกันอย่างมาก นอกเหนือจากเพปทิโดไกลแคนแล้วยังพบ teichoic acid ที่เชื่อมกับเพปทิโดไกลแคน ด้วยพันธะโควาเลนต์และช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผนังเซลล์ ชั้นของเพปทิโดไกลแคนในแบคทีเรียแกรมลบบางกว่าของแกรมบวกมาก (ประมาณ 1 ใน 10) และมีพันธะเพปไทด์ที่เชื่อมระหว่างเส้นเพปทิโดไกลแคนน้อยกว่า และไม่มีพันธะของ teichoic acid ที่เพิ่มความแข็งแรงดังนั้นผนังเซลล์ของพวกแกรมลบจึงแข็งแรงน้อยกว่าแกรมบวกมาก ชั้นนอกที่ติดกับเพปทิโดไกลแคน คือชั้นของลิโปโปรตีน (lipoprotein) ฟอสโฟลิพิด (phospholipid) และสารพอลิเมอร์คือ ลิโปพอลิแซ็กคาไรด์ (lipopolysaccharide) ผนังเซลล์ของของแบคทีเรียแกรมลบ เป็น endotoxin ที่พบเฉพาะในผนังเซลล์ของแกรมลบเท่านั้น ชั้นนอกสุดของผนังเซลล์หรือ outer envelope หรือ outer membrane มีโครงสร้างเหมือนกับเมมเบรนอื่นๆ ที่พบทั่วไป โดยมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากและประกอบด้วยแอนติเจนที่เหนี่ยวนำการสร้างแอนติบอดีในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม นอกจากนั้นชั้นนอกสุดนี้ยังทำหน้าที่ป้องกันสารเคมีที่เป็นพิษไม่ให้เข้าสู่ภายในเซลล์

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yong Zheng Pan และคณะ (2011) [26] ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์คอมโพสิตโคโดซาน โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ที่มีกราฟีนออกไซด์ (graphene oxide; GO) ลงไป เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อน เพื่อนำไปใช้ในทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า tensile ของกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจากเดิม และผลของการวิเคราะห์เชิงความร้อนก็พบว่า กราฟีนออกไซด์ที่มีการเติมที่ 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าเชิงความร้อนที่ดีที่สุด เนื่องจากว่ามีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของคอมโพสิต ดังนั้น กราฟีน-ออกไซด์ที่ใส่ลงในคอมโพสิต จะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านเชิงกล และ

เอกสารนี้เชิงความร้อน จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D.C. Stanier และคณะ (2014) [27] ได้ทำการศึกษาผลของการเสริมแรงของกราฟีนที่ใส่ลงในยางธรรมชาติโดยการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติที่มีการผสม กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน คือ ที่ 0 0.25 0.5 0.75 และ 1 โดยน้ำหนักพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์จะทำให้ค่าการเสียหายเนื่องจากความเครียดมีค่าลดลง แต่ก็จะทำให้ค่า strength และ young modulus มีค่าที่เพิ่มขึ้น นั่นก็แสดงให้เห็นว่ากราฟีนออกไซด์ มีส่วนช่วยให้แผ่นยางธรรมชาติมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น

Yiming Liu และคณะ (2018) [28] ได้ทำการศึกษาการยับยั้งแบคทีเรีย และ กลไกของกราฟีนออกไซด์โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบกราฟีนออกไซด์บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ เพื่อศึกษาการยับยั้งแบคทีเรียของเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* ซึ่งจากผลการทดลองก็พบว่าพอลิเมอร์ที่เคลือบกราฟีนออกไซด์สามารถยับยั้งแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงมีการนำเอากราฟีนออกไซด์มาประยุกต์ใช้ในเครื่องมือแพทย์ เพราะ กราฟีนออกไซด์ง่ายต่อการรีไซเคิลและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

Indrajith U.Rathnayake และคณะ (2015) [29] ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์ Ag-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles (Ag-TiO<sub>2</sub> NPs) ด้วยวิธีการเจือ Ag ลงใน TiO<sub>2</sub> เพื่อใช้เป็นนาโนฟิลเลอร์ที่ใช้เติมในโพลียเอทิลีน เพื่อปรับปรุงสมบัติในเรื่องของการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า โพลียเอทิลีนที่มีการเติม Ag-TiO<sub>2</sub> NPs มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.epidermis* *S.aureus* และ *E.coli* เมื่อเทียบกับโพลียเอทิลีนปกติ ภายใต้กระบวนการฉายแสงวิธีสเปค

W.G.I.U. Rathnayake และคณะ (2012) [30] ได้ทำการสังเคราะห์ และศึกษาโพลียเอทิลีนที่มีการเติม Ag-TiO<sub>2</sub> NPs ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อรา โดยการสังเคราะห์จะใส่อนุภาคซิลเวอร์ลงในโพลียเอทิลีน โดยมีการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยวิธีการรีดิวซ์ซิลเวอร์ไนเตรต โดยใช้โซเดียมซิเตรต เป็นตัวกลางในการละลาย ซึ่งการสังเคราะห์ครั้งนี้จะได้ Ag ที่มีความเสถียรที่สูง ดังนั้นจึงส่งผลให้โพลียเอทิลีนที่มีการเติมซิลเวอร์ออกไซด์ และโพลียเอทิลีนที่มีการเติมทั้งซิลเวอร์ออกไซด์ และ ซิลเวอร์ มี clear zone ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น โพลียเอทิลีนที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปจะ มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้น

Chao Li และคณะ (2013) [31] ได้ทำการสังเคราะห์ carbon nanoscrolls (CNSs) ที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยกระบวนการ sonication เพื่อทำการยับยั้งเชื้อรา *Candida albicans* และ *Candida tropical* และทำการเปรียบเทียบกับกราฟีนออกไซด์ที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไป ซึ่งผลที่ได้ก็คือ carbon nanoscrolls (CNSs) ที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโน กับกราฟีนออกไซด์ที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนนั้นจะมีศักยภาพในการยับยั้งเชื้อราที่สูง แต่บริเวณที่เป็นกราฟีนออกไซด์ที่ไม่ได้รับการทำเป็นคอมโพสิตจะมีศักยภาพในการยับยั้งเชื้อราที่ต่ำ ดังนั้นผลจากการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนนั้นจะทำให้คอมโพสิตมีศักยภาพในการยับยั้งเชื้อราที่สูงจึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในทางด้านการแพทย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

- 1) น้ำยาร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia, HA) กองการยางแห่งประเทศไทย
- 2) สารแขวนลอยโพแทสเซียมโอเลต (K-Oleate) เข้มข้นร้อยละ 10 กองการยางแห่งประเทศไทย
- 3) สารแขวนลอยซัลเฟอร์ (Sulphur, S) เข้มข้นร้อยละ 50 กองการยางแห่งประเทศไทย
- 4) สารแขวนลอยซิงค์ ไดเอทิลไดไทโคาร์บเมต (Zinc diethyldithiocarbamate, ZDEC) เข้มข้นร้อยละ 50 กองการยางแห่งประเทศไทย
- 5) สารแขวนลอยซิงค์ ทุเมอร์แคปโทเบนโซโซล (Zinc 2-mecaptobenzthiozolate, ZMBT) เข้มข้นร้อยละ 50 กองการยางแห่งประเทศไทย
- 6) สารแขวนลอยซิงค์-แอล (Wingstay - L) เข้มข้นร้อยละ 50 กองการยางแห่งประเทศไทย
- 7) สารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เข้มข้นร้อยละ 50 กองการยางแห่งประเทศไทย
- 8) สารแขวนลอยไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenylguanidine, DPG) เข้มข้นร้อยละ 33 กองการยางแห่งประเทศไทย
- 9) กราไฟต์ (Graphite) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma-Aldrich PTE,Ltd USA
- 10) โซเดียมไนเตรต (Sodium Nitrate;  $\text{NaNO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99.995 % เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma-Aldrich PTE,Ltd USA
- 11) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate;  $\text{KMnO}_4$ ) ความบริสุทธิ์ 99.0% เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Thermo Fisher Scientific Australia
- 12) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้นร้อยละ 96 เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S France
- 13) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide;  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เข้มข้นร้อยละ 40 ในน้ำ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S France

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการรศึกษเท่นั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 14) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric; HCl) เข้มข้นร้อยละ 37 บริษัท Fisher Scientific England
- 15) โพลีไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP) มวลโมเลกุลเฉลี่ย 40,000 กรัม/โมล บริษัท Sigma-Aldrich PTE,Ltd USA

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องแก้ว บริษัท Bomex
- 2) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnet bar)
- 3) ไมโครปิเปต (Micropipettes) บริษัท SCILAB
- 4) ตู้ดูดควัน Fume Hood) บริษัท FLEXLAB
- 5) ตู้อบลมร้อน Oven) บริษัท MEMMERT. UNB 300
- 6) เครื่องชั่งแบบละเอียด บริษัท Mettler Toledo
- 7) เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน บริษัท LMS รุ่น HTS-1003
- 8) เตาอบไมโครเวฟ (Microwave Oven) บริษัท SAMSUNG รุ่น MG23F301EAS
- 9) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) บริษัท Shimadzu, Japan รุ่น XRD-6100
- 10) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared; FT-IR) บริษัท Thermo Fisher Scientific Inc., USA รุ่น Nicolet iS50
- 11) เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy) บริษัท Thermo Scientific รุ่น DXR SmartRaman
- 12) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) บริษัท Japan รุ่น JEOL-JSM5800LV
- 13) เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; EDS) บริษัท Oxford ISIS 300
- 14) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectroscopy; UV-Vis) บริษัท Thermo Scientific, USA รุ่น Evolution 201
- 15) เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Gravity Analysis; TGA) บริษัท Perkin, Pyris 1 TGA
- 16) เครื่องทดสอบทางกล (Universal testing machine; UTM) บริษัท LLOYD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

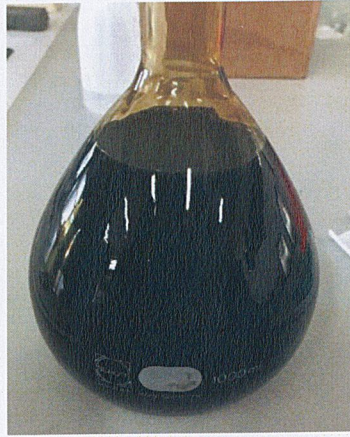
### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการเตรียมกราฟีนออกไซด์ สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน และโพลีเมอร์ธรรมชาติ ดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์

- 1) ชั่งกราไฟต์ 4 กรัม  $\text{NaNO}_3$  2 กรัม และ  $\text{KMnO}_4$  12 กรัม
- 2) เท  $\text{NaNO}_3$  ผสมกราไฟต์ลงในขวดก้นกลมที่แช่อยู่ในอ่างน้ำแข็ง
- 3) เติม 98%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  92 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กให้เข้ากัน เป็นเวลา 10 นาที จะได้สารแขวนลอยเนื้อเดียวกันสีดำ
- 4) ค่อยๆ เติม  $\text{KMnO}_4$  ลงในขวดก้นกลม ทำการปั่นกวนต่ออีก 15 นาที จะได้สารแขวนลอยสีเขียวอมดำ
- 5) จากนั้นนำขวดก้นกลมไปแช่ในอ่างน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
- 6) เติมน้ำกลั่นลงในขวดก้นกลม 160 มิลลิลิตร ปั่นกวนให้เข้ากันประมาณ 5 นาที
- 7) นำขวดก้นกลมแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที
- 8) เติมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  12 มิลลิลิตร
- 9) เติม 10%  $\text{HCl}$  10 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม ปั่นเป็นเวลา 5 นาที
- 10) ทำการล้างโดยการเทสารจากขวดก้นกลมลงในปีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร เติมน้ำให้เต็ม รอให้ตกตะกอนประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นเทน้ำทิ้งและทำการเติมน้ำใหม่และใช้แท่งแก้วคนรอให้ตกตะกอน ทำซ้ำประมาณ 5 รอบจากนั้นทำการเทน้ำออกให้หมดจะได้โคลนสีน้ำตาลของกราไฟต์ออกไซด์
- 11) นำสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอนที่สิบ มา 100 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ขวดสี่คอ เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางไว้ในตู้อัลตราโซนิค (Ultrasonication) เพื่อทำการ sonicated เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 12) นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ด้วยความเร็ว 7000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ในน้ำกลั่น ดังแสดงในรูปที่ 3.1

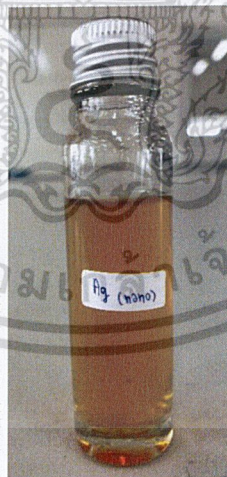
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (GO) เข้มข้น

### 3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร

- 1) ชั่ง PVP 0.3 กรัม ลงในบีกเกอร์เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลาย PVP ชั่ง  $\text{AgNO}_3$  0.3 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร คนให้เป็นเนื้อเดียวกันจะได้สารละลาย  $\text{AgNO}_3$
- 2) นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเทลงในสารละลาย PVP อัตราส่วน 1:1 ปั่นกวนให้เข้ากันประมาณ 5 นาที
- 3) นำเข้าไมโครเวฟ 300 วัตต์ นำออกมาจากเครื่องไมโครเวฟทุกๆ 15 วินาที ทำการคนเพื่อลดการเดือด จนครบ 210 วินาที สารจะเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลซึ่งก็คือสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตรเข้มข้น 74.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร (AgNPs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การเตรียมโฟมยางธรรมชาติ (NRF)

การเตรียมโฟมยางธรรมชาติด้วยกระบวนการดัดแปลงกระบวนการของดันลอป (modified Dunlop's process) โดยมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

- 1) ชั่งน้ำยางชั้น 60 % 100 phr ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กให้เข้ากันประมาณ 5 นาที จากนั้นเติม 10% K-Oleate 1.8 phr เทผสมรวมกันในบีกเกอร์ ปั่นให้เข้ากันอีกประมาณ 5 นาที
  - 2) เติม 50% S 2 phr, 50% ZMBT 1phr, 50% ZDEC 1 phr และ 50% Wingstay-L 1 phr ลงใน บีกเกอร์ในขั้นตอนที่ 1) ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที
  - 3) เทน้ำยางและสารเคมีที่เตรียมไว้ลงในหม้อ แล้วใช้เครื่องตี ตีน้ำยางและสารเคมี ให้เกิดเป็นฟองฟูขึ้น ใช้เวลาประมาณ 3 นาที
  - 4) เติม 50% ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) 3 phr และ 33% ไดฟีนิลกัวนินิดีน (Diphenylguanidine, DPG) 1.4 phr แล้วใช้เครื่องตีฟองตีให้เข้ากับน้ำยางเป็นเวลา 1 นาที
  - 5) เติม 12.5% โซเดียมซิลิโกฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) 1.2 phr แล้วใช้เครื่องตีฟองตีให้เข้ากับน้ำยางเป็นเวลา 20 วินาที
  - 6) เทโฟมยางที่ได้ลงในแม่พิมพ์ที่ต้องการ แล้วปล่อยให้โฟมยางเซตตัวเป็นเวลา 2 นาที
  - 7) นำแม่พิมพ์เหล่านั้นไปอบที่ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
  - 8) เมื่อแม่พิมพ์เย็นตัวลง ทำการแกะโฟมยางออกจากแม่พิมพ์ แล้วผึ่งลมเป็นเวลา 1 คืน
  - 9) ชักล้างโฟมยางที่ได้ด้วยน้ำอุ่น 70 °C และอบโฟมยางให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 คืน ก็จะได้โฟมยางธรรมชาติ
- \*หมายเหตุ: สัดส่วนของสารเคมีทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.3 การเตรียมรูปโฟมยางในแบบพิมพ์**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การเตรียมโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ (NRF+GO)

(ศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน ได้แก่  $2 \times 10^{-4}$  phr,  $6 \times 10^{-4}$  phr และ  $1 \times 10^{-3}$  phr)

1) ชั่งน้ำยางชั้น 60 % 100 phr ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กให้เข้ากันประมาณ 5 นาที จากนั้นเติม 10% K-oleate 1.8 phr เทผสมรวมกันในบีกเกอร์ ปั่นให้เข้ากันอีกประมาณ 5 นาที

2) เติม 50% S 2 phr, 50% ZMBT) 1 phr, 50% ZDEC 1 phr, 50% Wingstay-L 1 phr เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่  $2 \times 10^{-4}$  phr (1 มิลลิลิตร) ,  $6 \times 10^{-4}$  phr (3 มิลลิลิตร) และ  $1 \times 10^{-3}$  phr (5 มิลลิลิตร) และน้ำกลั่นปริมาณแตกต่างกัน ได้แก่  $1.1 \times 10^{-2}$  phr (4 มิลลิลิตร),  $5 \times 10^{-2}$  phr (2 มิลลิลิตร) และไม่เติมตามลำดับ เพื่อให้มีปริมาตร 5 มิลลิลิตร เท่ากัน ลงในบีกเกอร์ในขั้นตอนที่ 1) ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที

3) เติมน้ำยางและสารเคมีที่เตรียมไว้ลงในหม้อ แล้วใช้เครื่องตี ตีน้ำยางและสารเคมี ให้เกิดเป็นฟองฟูขึ้น ใช้เวลาประมาณ 3 นาที

4) เติม 50% ZnO 3 phr และ 33% DPG 1.4 phr แล้วใช้เครื่องตีฟองตีให้เข้ากัน น้ำยางเป็นเวลา 1 นาที

5) เติม 12.5% SSF 1.2 phr แล้วใช้เครื่องตีฟองตีให้เข้ากัน น้ำยางเป็นเวลา 10 วินาที

6) เทโพลีเมอร์ที่ได้ลงในแม่พิมพ์ที่ต้องการ แล้วปล่อยให้โพลีเมอร์เซ็ทตัวเป็นเวลา 2 นาที

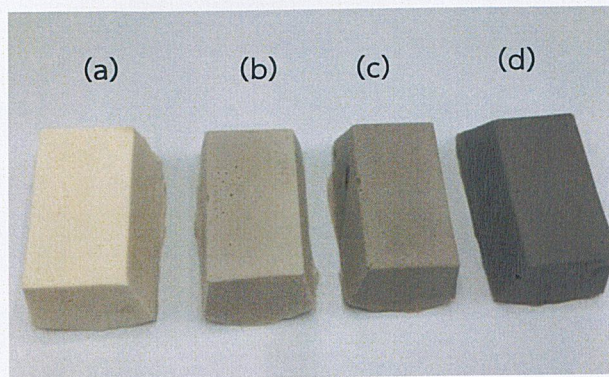
7) นำแม่พิมพ์ไปอบที่  $80^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

8) เมื่อแม่พิมพ์เย็นตัวลง ทำการแกะโพลีเมอร์ออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปผึ่งลมเป็นเวลา 1 คืน

9) ชักล้างโพลีเมอร์ที่ได้ด้วยน้ำอุ่น  $70^{\circ}\text{C}$  และอบโพลีเมอร์ให้แห้งที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 คืน ก็จะได้โพลีเมอร์อย่างธรรมชาติ

\*หมายเหตุ : สามารถเตรียมได้เช่นเดียวกับการเตรียมโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติแต่จะมีสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์ตามตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างโพลีเมอร์ธรรมชาติ (a) NRF และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 และ (d) NRF+GO-5

### 3.3.5 การเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมซิลเวอร์นาโน (NRF+GO+AgNPs)

(ศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่  $6 \times 10^{-4}$  คงที่ กับเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่  $5 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-3}$  และ  $2 \times 10^{-3}$ )

1) ชั่งน้ำยางชั้น 60 % 100 phr ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กให้เข้ากันประมาณ 5 นาที จากนั้นเติม 10% K-oleate 1.8 phr เทผสมรวมกันในบีกเกอร์ ปั่นให้เข้ากันอีกประมาณ 5 นาที

2) เติมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr (3 มิลลิลิตร) คงที่ และ เติมซิลเวอร์นาโน (Silver Nano; Ag nano) ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่  $5 \times 10^{-4}$  phr (0.25 มิลลิลิตร),  $1 \times 10^{-3}$  phr (0.5 มิลลิลิตร) และ  $2 \times 10^{-3}$  phr (1 มิลลิลิตร) และน้ำกลั่นในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่  $5 \times 10^2$  phr (1.75 มิลลิลิตร),  $4 \times 10^2$  phr (1.5 มิลลิลิตร) และ  $3 \times 10^2$  phr (1 มิลลิลิตร) ให้ปริมาตรรวมเป็น 5 มิลลิลิตร เท่ากัน ลงในอีกบีกเกอร์หนึ่ง จากนั้นปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กให้เข้ากันประมาณ 10 นาที

3) เติม 50% S 2 phr, 50% ZMBT 1 phr, 50% ZDEC 1 phr, 50% Wingstay-L 1 phr และเทซิลเวอร์นาโนจากบีกเกอร์ในขั้นตอนที่ 2) ลงในบีกเกอร์ในขั้นตอนที่ 1) ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที

4) เทน้ำยางและสารเคมีที่เตรียมไว้ลงในหม้อ แล้วใช้เครื่องตี ตีน้ำยางและสารเคมีให้เกิดเป็นฟองฟูขึ้น ใช้เวลาประมาณ 3 นาที

5) เติม 50% ZnO 3 phr และ 33% DPG 1.4 phr แล้วใช้เครื่องตีฟองตีให้เข้ากับน้ำยางเป็นเวลา 1 นาที

6) เติม 12.5% SSF 1.2 phr แล้วใช้เครื่องตีฟองตีให้เข้ากับน้ำยางเป็นเวลา 10 วินาที

7) เทโพลีเมอร์ที่ได้ลงในแม่พิมพ์ที่ต้องการ แล้วปล่อยให้แห้งให้โพลีเมอร์แข็งตัวเป็นเวลา 2 นาที

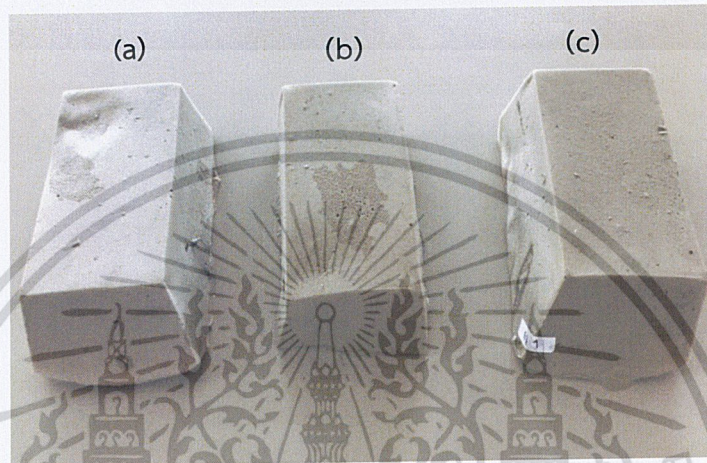
8) นำแม่พิมพ์ไปอบที่  $80^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) เมื่อแม่พิมพ์เย็นตัวลง ทำการแกะโฟมยางออกจากแม่พิมพ์ แล้วผึ่งลมเป็นเวลา 1 คืน

10) ซักล้างโฟมยางที่ได้ด้วยน้ำอุ่น  $70^{\circ}\text{C}$  และอบโฟมยางให้แห้งที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 คืน ก็จะได้โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

\*หมายเหตุ : สามารถเตรียมได้เช่นเดียวกับการเตรียมโฟมยางธรรมชาติแต่จะมีสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์ตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างโฟมยางธรรมชาติผสม (a) NRF+GO-3+AgNPs-0.25 (b) NRF+GO-3+AgNPs-0.5 และ (c) NRF+GO-3+AgNPs-1

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำโฟมยางธรรมชาติ

สารเคมี	phr
น้ำยางธรรมชาติ	100
K-oleate	1.8
Sulfur	2.0
ZMBT	1.0
ZDEC	1.0
Wingstay-L	1.0
ZnO	3.0
DPG	1.4
SSF	1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณกราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโนของแต่ละตัวอย่างในการทำโพลีเมอร์ธรรมชาติ

ตัวอย่าง	กราฟีนออกไซด์ (mL)	กราฟีนออกไซด์ (phr)	อนุภาคซิลเวอร์นาโน (mL)	อนุภาคซิลเวอร์นาโน (phr)	น้ำ (mL)
NRF	-	-	-	-	5
NRF+GO-1	1	$2 \times 10^{-4}$	-	-	4
NRF+GO-3	3	$6 \times 10^{-4}$	-	-	2
NRF+GO-5	5	$1 \times 10^{-3}$	-	-	-
NRF+GO-3+AgNPs-0.25	3	$6 \times 10^{-4}$	0.25	$5 \times 10^{-4}$	1.75
NRF+GO-3+AgNPs-0.5	3	$6 \times 10^{-4}$	0.5	$1 \times 10^{-3}$	1.5
NRF+GO-3+AgNPs-1	3	$6 \times 10^{-4}$	1	$2 \times 10^{-3}$	1

หมายเหตุ : NRF หมายถึง โพลีเมอร์ธรรมชาติ (Natural rubber)

NRF+GO-1 หมายถึง โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ (GO) 1 มิลลิลิตร โดยคิดเป็นปริมาณ  $2 \times 10^{-4}$  phr

NRF+GO-3+Ag-0.25 หมายถึง โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ (GO) 3 มิลลิลิตร โดยคิดเป็นปริมาณ  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) 0.25 มิลลิลิตร โดยคิดเป็นปริมาณ  $5 \times 10^{-4}$  phr

### 3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

#### 3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

ใช้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของโพลีเมอร์ธรรมชาติโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน เนื่องจากโพลีเมอร์ธรรมชาติไม่นำไฟฟ้าจึงต้องทำการเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำก่อนแล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500x 1000x และ 2000x

#### 3.4.2 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDS)

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ ธาตุโบรอนถึงธาตุยูเรเนียม วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ หลักการของเทคนิคนี้ คือ ให้รังสีเอ็กซ์เข้าไปชนตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์จะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดของธาตุหลุดออกไปทำให้อิเล็กตรอนวงถัดมาเข้ามาแทนที่และรั้งรั้งไม่พอก็จะปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา ซึ่งรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจะมีพลังงานที่ต่ำกว่าและรั้งรั้งไม่พอก็จะปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา ซึ่งรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจะมีพลังงานที่ต่ำกว่าและรั้งรั้งไม่พอก็จะปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา

คายพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยแต่ละธาตุจะมีค่าพลังงานเฉพาะตัว ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์หองค์ประกอบและปริมาณของธาตุต่างๆในโพลิเมอร์ตามธรรมชาติ โพลิเมอร์ตามธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์และโพลิเมอร์ตามธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

### 3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope)

ใช้ศึกษาขนาดอนุภาคและโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เล็กระดับนาโนเมตร ทำให้การศึกษาขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบปกติไม่สามารถตรวจสอบได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน โดยการหยดตัวอย่างลงบน Cu-grid ที่จิ้งจกแห้ง ซึ่งสามารถตรวจสอบอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนได้ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการส่องผ่านตัวอย่าง และ TEM สามารถศึกษาตัวอย่างที่มีขนาดเล็กที่มีขนาดตั้งแต่ 0.2 นาโนเมตร ถึง 0.2 มิลลิเมตรได้

### 3.4.4 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วง Ultraviolet (UV) และ Visible (Vis) ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 190 ถึง 900 นาโนเมตรได้ โดยหลักการ คือ เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วง UV หรือ Visible ที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ใช้ในการศึกษาสเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

### 3.4.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy; FT-IR)

เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (2.5-25  $\mu\text{m}$ ) มีความถี่ตรงกับ

ความถี่การสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อตัวอย่างได้รับพลังงานจลน์รังสีเอกสารเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่ปรากฏในสเปกตรัมการสั่นของโมเลกุลของสาร เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขการวัดที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรดที่พอเหมาะ จะเกิดการสั่นของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผล เป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave Number กับค่าการส่งผ่านของแสงเรียกว่า IR Spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะโมเลกุลของสาร จึงสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่ที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักอะตอมของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลนั้นๆ ซึ่งใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโพลิเมอร์ธรรมชาติและโพลิเมอร์สังเคราะห์

#### 3.4.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของ รังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิจากระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพ การผลิตใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่างๆ โดยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของแต่ละตัวอย่างจะมีองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึกและความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง ใช้เทคนิคนี้ในการตรวจสอบองค์ประกอบของโพลิเมอร์ธรรมชาติ

#### 3.4.7 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เพื่อศึกษาเชิงโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันด้วยปรากฏการณ์การกระเจิงแสงของปรากฏการณ์รามาน ของสารตัวอย่างเพื่อหาองค์ประกอบโครงสร้างของวัตถุนั้นๆ ว่าประกอบด้วยสารใดและมีโครงสร้างเป็นอย่างไร โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Dispersive Raman Spectroscopy สามารถแสดงตำแหน่งของสารเคมีแต่ละชนิดได้ โดยมีความสามารถในการแยกในแนวลึก (Confocal depth resolution) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 ไมครอน อาศัยหลักการ กระเจิงของแสงที่เกิดจากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลของสาร สมมติให้แสง laser ความยาวคลื่นหนึ่งผ่านสารของเหลวที่โปร่งแสง จะมีอนุภาคแสงจำนวนหนึ่งที่ทะลุผ่านไป ขณะที่บางส่วนจะชนเข้ากับโมเลกุลของสารนั้นเป็นอนุภาคที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่น่าจะเห็นไปเซปรีเซชันต้นการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารแล้วเปลี่ยนทิศทางในการชนกันนั้นโดยส่วนมากพลังงานของแสงหลังการชนจะไม่เปลี่ยนแปลง ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาชนิดของสารประกอบที่อยู่ในรูปของกราฟีนออกไซด์

### 3.4.8 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ นำเทคนิคนี้มาใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนออกไซด์ โพลีเอทิลีนเทฟลอน และโพลีเอทิลีนออกไซด์กับซิลเวอร์นาโน

### 3.4.9 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึงทิศทางเดียว (Uniaxial tensile test) เป็นการทดสอบที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง โดยค่าสมบัติเชิงกลที่สนใจคือ ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength;  $\sigma_y$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบและเลือกสรรวัสดุเพื่อนำมาใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างถูกต้องเหมาะสม การที่จะหาความแข็งแรงของวัสดุด้วยการทดสอบแรงดึงนั้นทำได้โดยค่อยๆ เพิ่มแรงที่กระทำต่อวัสดุทีละน้อยจนวัสดุเกิดการแตกหัก แรงกระทำสูงสุดที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเป็นค่าที่นำไปหาความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งมักประเมินออกมาในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress;  $\sigma$ ) และความเครียด (Strain;  $\epsilon$ ) โดยความเค้นให้นิยามเป็นสัดส่วนของแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ส่วนความเครียดให้นิยามเป็นสัดส่วนของระยะยืดตัวต่อความยาวเดิม เตรียมชิ้นงานและกำหนดสถานะเครื่องทดสอบได้ดังนี้

- ขนาดชิ้นงาน 10 x 70 ตารางมิลลิเมตร
- ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที
- ความยาวเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จึงนำมาใช้ในการศึกษาหาค่าความแข็งแรงเชิงกลของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์และโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับซิลเวอร์นาโน

#### 3.4.10 การทดสอบแรงอัด (Compression Test)

แรงภายนอกที่มากระทำในลักษณะการกดอัด (Compressive) และแนวแรงตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ทำให้วัสดุออกแรงต้านทานเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหัก ทดสอบโดยเพิ่มแรงอัดอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอจนกระทั่งความหนาของโพลีเอทิลีนลดลง 50 % เตรียมชิ้นงานและกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบได้ดังนี้

- ความหนาของชิ้นงาน 40 มิลลิเมตร
- ความเร็วในการอัด 500 มิลลิเมตรต่ออนาที
- จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดสอบ 10 ครั้งต่อชิ้นงาน

โดยการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จึงนำมาใช้ในการศึกษาหาค่าความแข็งแรงเชิงกลของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์และโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

#### 3.4.11 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-Bacterial Test)

ทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์และโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับซิลเวอร์นาโนโดยวิธี Agar disc diffusion วิเคราะห์ผล การทดลองจากการเกิดโซนยับยั้ง (Inhibition zone) ทดสอบโดยใช้เชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *E.coli* (แกรมลบ) และ *S.aureus* (แกรมบวก)

#### 3.4.12 การทดสอบมุมสัมผัส (Contact Angle)

ทดสอบความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์และโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยพบว่าหากมุมของของเหลวที่วัดได้เมื่อเทียบกับระนาบอ้างอิงมีมุมที่กว้างแสดงว่าของเหลวที่ทำการวัดนั้นมีแรงตึงผิวสูงแสดงว่าผิวของตัวอย่างมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และในทางกลับกันหากมุมที่วัดได้เป็นมุมที่แคบแสดงว่าจะมีแรงตึงผิวน้อยขึ้นแสดงว่าผิวของตัวอย่างมีความชอบน้ำ (Hydrophilic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

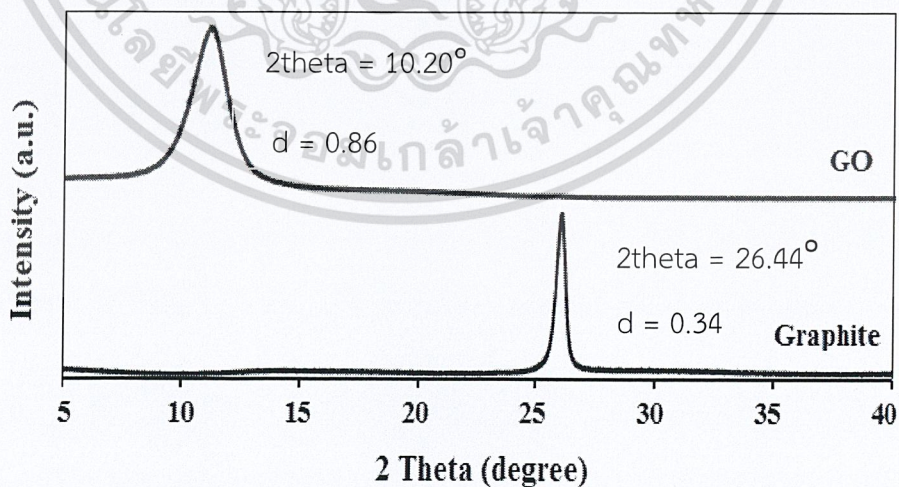
## ผลการวิจัยและการอภิปราย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์และเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยกระบวนการทางไมโครเวฟโดยใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นตัวรีดิวซ์และทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ จากนั้นทำการเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) และโพลีเอทิลีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ และโพลีเอทิลีนไกลคอลผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีนไกลคอลให้ดีขึ้นและเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย พิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrometry) ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน (Raman Spectroscopy) สมบัติเชิงความร้อน (TGA) สมบัติเชิงกลทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ทดสอบแรงอัด (Compression Test) การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-bacterial Test) และศึกษาความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำโดยการทดสอบมุมสัมผัส (Contact Angle)

### 4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์

#### 4.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะผลึกและออสัณฐาน

ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงกราฟไฟต์และผงกราฟีนออกไซด์



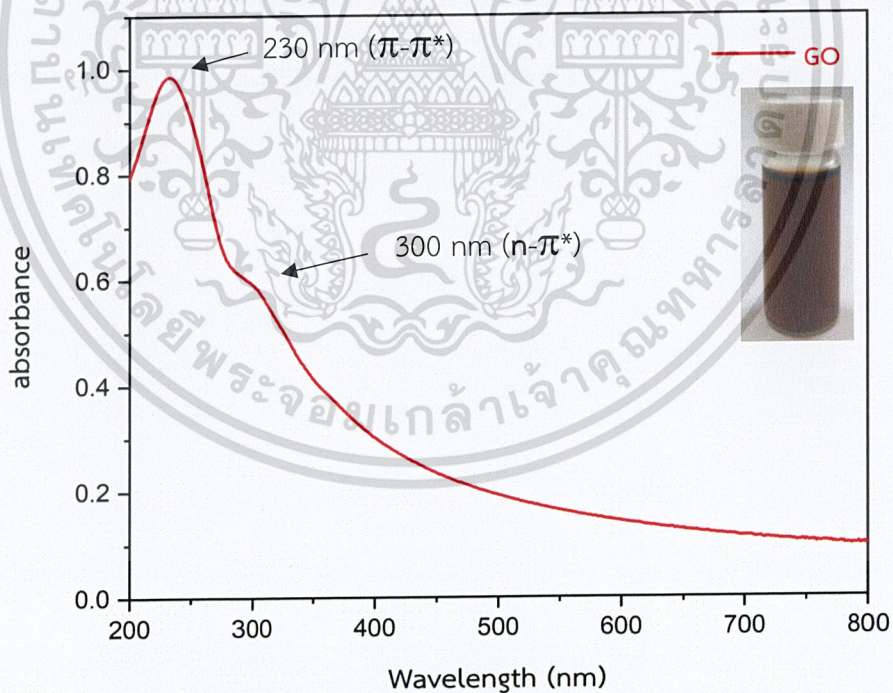
รูปที่ 4.1 แสดง XRD Pattern ของผงกราฟไฟต์ (Graphite) และผงกราฟีนออกไซด์ (GO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จะเห็นว่าพบพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $26.44^\circ$  มีระยะห่างระหว่างระนาบ คือ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งเป็นมุมการเลี้ยวเบนของกราฟาไฟต์ เนื่องจากกราฟาไฟต์ที่เกิดจากอะตอมของ คาร์บอนเรียงตัวกันเป็นวงหกเหลี่ยมด้วยพันธะโควาเลนต์และเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างลักษณะ เหมือนกับรังผึ้ง มีความเป็นผลึกสูงทำให้พีคมีความเข้มสูง แต่เมื่อนำกราฟาไฟต์ไปทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันด้วยกรดเข้มข้น คือ กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ ) ทำให้มีหมู่คาร์บอกซิล ( $-COOH$ ) หมู่ไฮดรอกซิล ( $-OH$ ) หมู่คาร์บอนิล ( $-C=O$ ) และหมู่อีพอกซี ( $C-O$ ) แทรกอยู่ตามชั้นของกราฟาไฟต์ ทำให้ระยะห่างระหว่างผลึกมากขึ้นและส่งผลให้ความเป็นผลึกลดลงจึง เกิดพีคของกราฟาไฟต์ออกไซด์ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $10.20^\circ$  มีระยะห่างระหว่างระนาบ คือ 0.86 นาโนเมตร [32]

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสง

เทคนิค UV-visible spectrophotometry (UV-Vis) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของสาร โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของแผ่นกราฟาไฟต์ออกไซด์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ ค่าการดูดกลืนแสงของกราฟาไฟต์ออกไซด์ (GO) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2



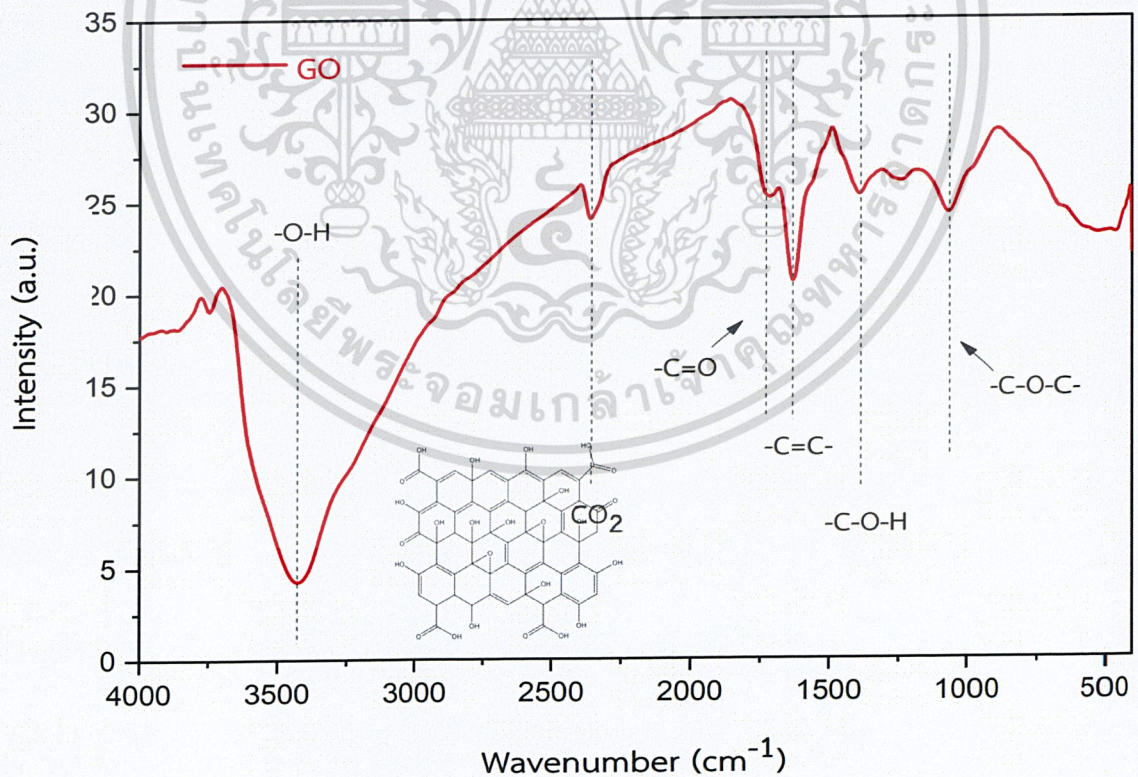
รูปที่ 4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของกราฟาไฟต์ออกไซด์ (GO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงพบว่า กราฟีนออกไซด์จะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 230 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะจาก  $\pi-\pi^*$  และพบการเปลี่ยนสถานะจาก  $n-\pi^*$  ซึ่งเป็นพีคเล็ก ๆ ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 300 นาโนเมตร โมเลกุลที่มีพันธะคู่โดดเดี่ยว (Isolate double bond) หรือพันธะคู่ต่อเนื่อง (Conjugated double bond) ส่งผลต่อความยาวคลื่นของการเปลี่ยนสถานะจาก  $\pi-\pi^*$  ซึ่งความยาวคลื่นเกิดได้ตั้งแต่ 220 นาโนเมตรเป็นต้นไป โดยโมเลกุลที่มีพันธะคู่ต่อเนื่องอิเล็กตรอนใน  $\pi$  ออบิทัลหนึ่งสามารถกระจายตัวไปยัง  $\pi$  ออบิทัลอื่นที่อยู่ในโมเลกุลนั้นได้ ทำให้พันธะคู่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน (C=C) อ่อนลง จึงใช้พลังงานทรานซิชันลดลง ส่วนการเปลี่ยนสถานะจาก  $n-\pi^*$  เกิดกับโมเลกุลที่มีทั้ง  $n$  (non-bonding) และ  $\pi$  ออบิทัล เช่น สารประกอบคาร์บอกซิลิกหรือคีโตนที่มีคาร์บอนออกซิเจน (C=O) [33]

#### 4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่างๆสามารถพิจารณาจากสเปกตรัมของ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของกราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดง FTIR สเปกตรัมของกราฟีนออกไซด์ (GO)

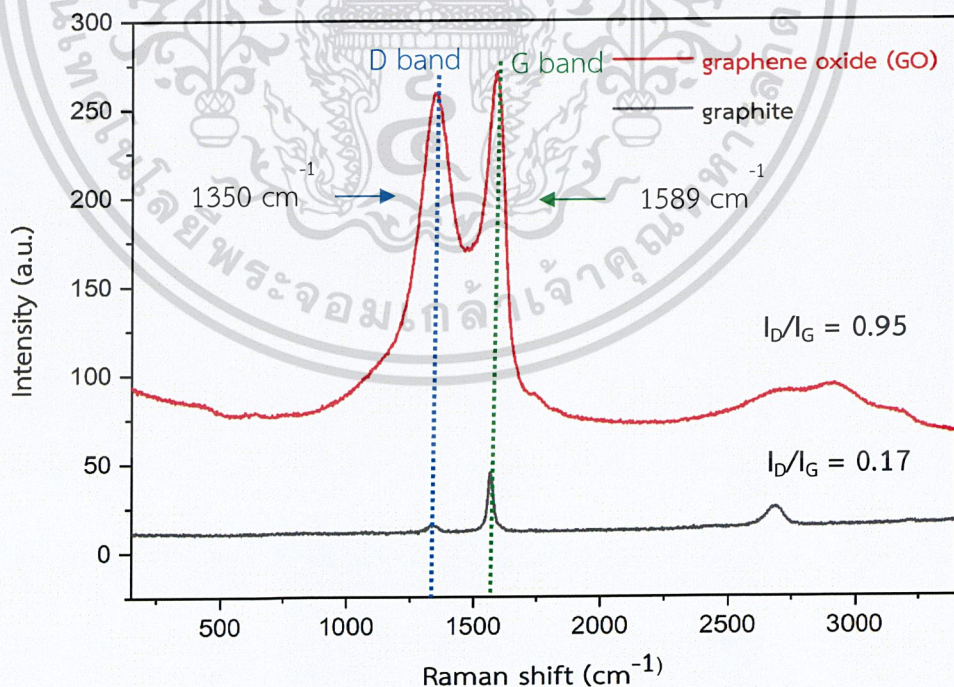
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบแถบการสั่นของกราฟีนออกไซด์ (GO) โดยแสดงความถี่ที่เลขคลื่นประมาณ  $3434\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของพันธะ (-O-H) บริเวณความถี่ที่เลขคลื่นประมาณ  $1630\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของพันธะ (-C=C-) ของวงอะโรมาติก ความถี่ที่เลขคลื่นประมาณ  $1727\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของพันธะ (-C=O) ของสารประกอบคาร์บอนิกและคาร์บอกซิลิก และที่ความถี่ที่เลขคลื่นประมาณ  $1062\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของพันธะแอลคอกซี (-C-O-C) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่พบแสดงหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์ โดยการปรากฏแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เกิดจากกระบวนการออกซิไดซ์กราฟไฟต์เป็นกราฟีนออกไซด์ จึงทำให้หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิก คาร์บอกซิลิก และอีพอกซี เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของแผ่นและในวงอะโรมาติกของกราฟไฟต์ ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ และพบการสั่นความถี่ที่เลขคลื่นประมาณ  $2355\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เนื่องจากการเก็บรักษากราฟีนออกไซด์รวมทั้งความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ [34]

#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน

เทคนิครามานเป็นเทคนิคใช้หาความยาวพันธะในโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว ซึ่งจะทำให้สามารถระบุหาประเภทของสารตัวอย่างได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน (Raman spectroscopy) ของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่งแสดงผลการศึกษาดังรูปที่ 4.4



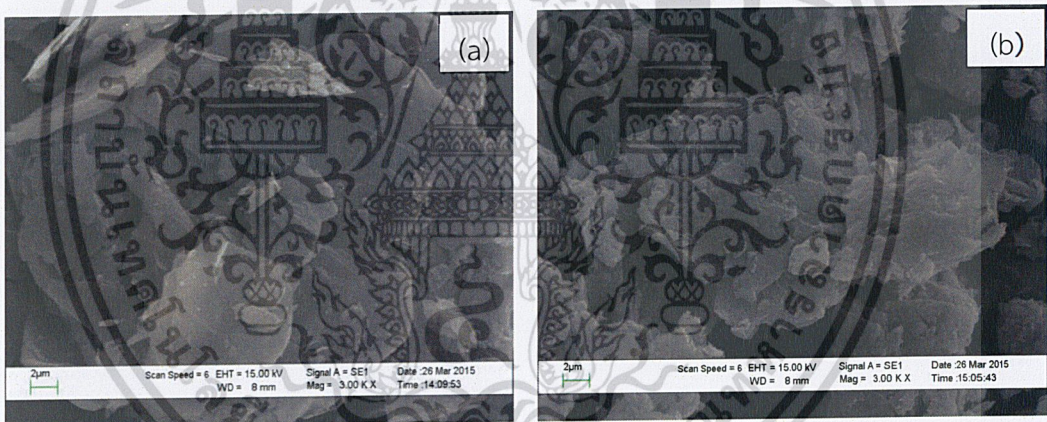
รูปที่ 4.4 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานอัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบ (Defect) ของคาร์บอนในสเปกตรัม โดยกราฟแสดงพีคเล็กๆ ของตำแหน่ง D-band ที่ประมาณ  $1345\text{ cm}^{-1}$  เนื่องจากเป็นกราฟที่ได้จากการสังเคราะห์ทำให้มีข้อบกพร่องของคาร์บอนที่เชื่อมต่อกันไม่สมบูรณ์ และพีคของตำแหน่ง G band ที่ประมาณ  $1567\text{ cm}^{-1}$  อัตราส่วน  $I_D/I_G$  ของกราฟนี้มีค่าเท่ากับ 0.17 ส่วนกราฟฟีนออกไซด์พบพีคของตำแหน่ง D band ที่ประมาณ  $1350\text{ cm}^{-1}$  พีคของตำแหน่ง G band ที่ประมาณ  $1589\text{ cm}^{-1}$  อัตราส่วน  $I_D/I_G$  มีค่าเท่ากับ 0.95 เนื่องจากเกิดข้อบกพร่อง (defect) และความไม่เป็นระเบียบ (disorder) ที่เกิดจากการสังเคราะห์ คือ มีหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล และอีพอกซี ในโครงสร้าง [35]

#### 4.1.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาค

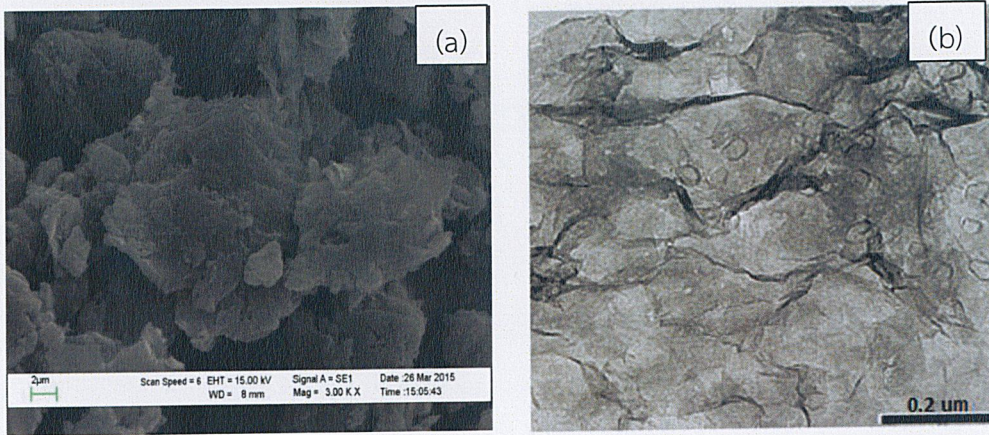
ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของของสารตัวอย่างในระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) โดยทำการศึกษาผงกราฟไฟต์ และผงกราฟฟีนออกไซด์ ซึ่งแสดงผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง (a) และ (b) SEM ที่กำลังขยาย 3000x ของผงกราฟไฟต์

จากรูปที่ 4.5 ภาพ (a) และ (b) แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าพื้นผิวของผงกราฟไฟต์มีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง (a) SEM ที่กำลังขยาย 3000x ของผงกราฟีนออกไซด์ และ (b) TEM ของกราฟีนออกไซด์

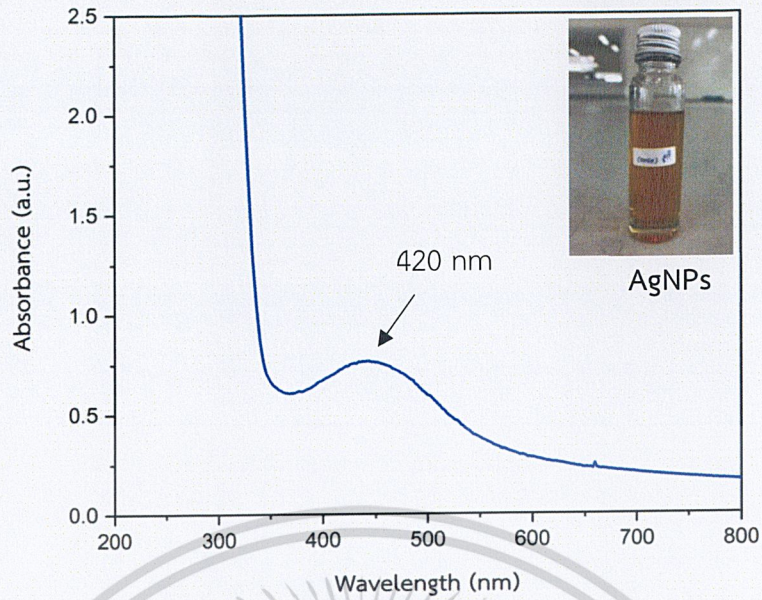
จากรูปที่ 4.6 ภาพ (a) แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าพื้นผิวของผงกราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นขรุขระ ซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ และภาพ (b) แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านพบว่ากราฟีนออกไซด์เป็นแผ่นบางเนื่องจากแสงสามารถส่องผ่านได้

## 4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสง

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) หลังเข้าไมโครเวฟ ได้ผลดังแสดงในรูป 4.7 พบว่าสารละลายซิลเวอร์เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 210 วินาที จะพบพีคค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 420 นาโนเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีรูปทรงคล้ายทรงกลมและยังสามารถยืนยันการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยตาได้จากสีของสารแขวนลอยจะเปลี่ยนจากสารละลายใสไม่มีสีเป็นสารแขวนลอยสีเหลืองอมน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.48 แสดงให้เห็นว่า PVP สามารถเป็นตัวรีดิวซ์  $\text{Ag}^+$  เป็น AgNPs ได้ภายใต้กระบวนการไมโครเวฟ และยังเป็นตัวช่วยรักษาเสถียรภาพของ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้อีกด้วย [21]

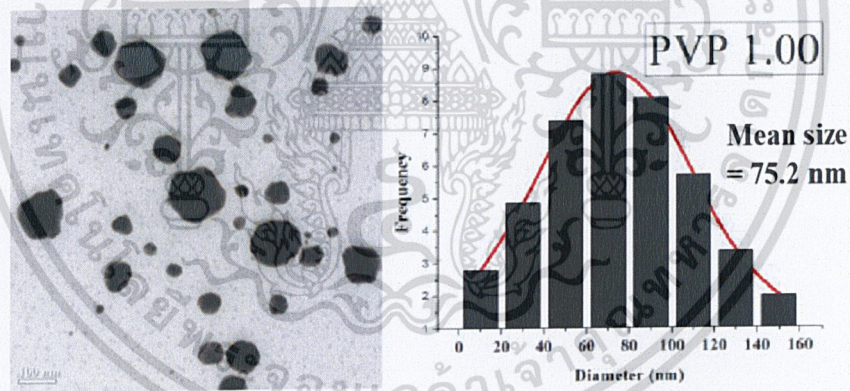
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิลเวอร์นาโนหลังเข้าไมโครเวฟ

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

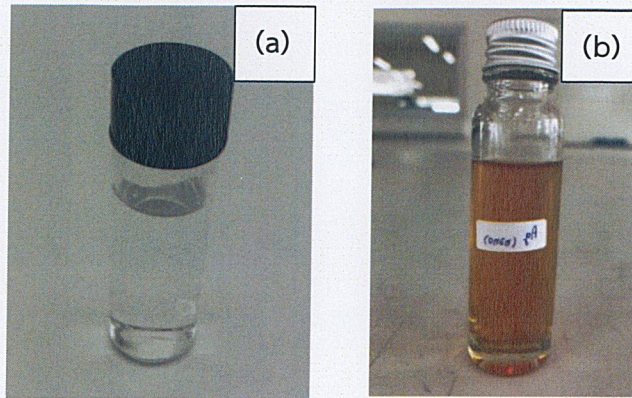
ผลการวิเคราะห์ขนาดและอนุภาคของอนุภาคซิลเวอร์นาโน แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง TEM ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน และ ขนาดของการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยอัตราส่วน PVP ที่ 1:1 [21]

จากรูปที่ 4.8 แสดงภาพจากการถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคซิลเวอร์นาโนหลังจากได้รับคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 210 วินาที โดยสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเข้มข้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเท่ากับ 74.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงรูปร่างของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีลักษณะเป็นทรงกลม และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 75.2 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

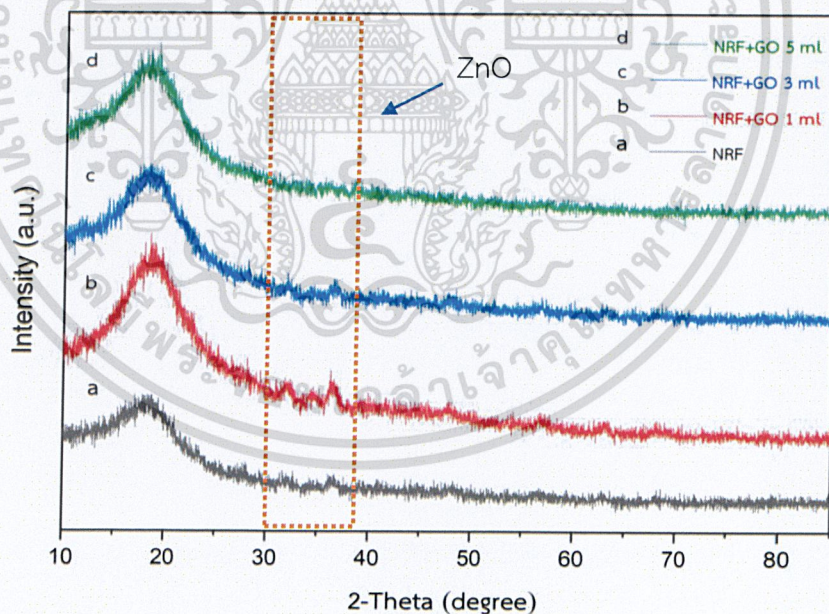


รูปที่ 4.9 แสดงสีของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน (a) ก่อนผ่านกระบวนการทางไมโครเวฟ และ (b) หลังผ่านกระบวนการทางไมโครเวฟ 210 วินาที

### 4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม

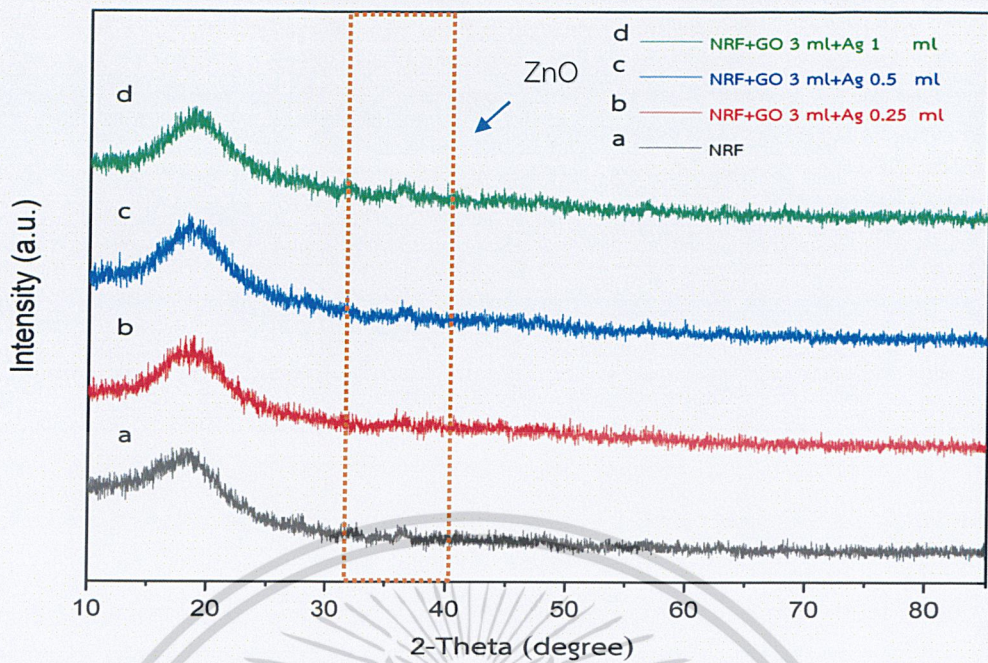
#### 4.3.1 ผลการตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐาน

ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 – 4.11



รูปที่ 4.10 แสดง XRD pattern ของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ (a) NRF (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 และ (d) NRF+GO-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดง XRD pattern ของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ (a) NRF (b) NRF+GO-3+Ag-0.25 (c) NRF+GO-3+Ag-0.5 และ (d) NRF+GO-3+Ag-1

จากรูปที่ 4.10 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่า (a-d) จะปรากฏแถบเอกลักษณ์ ของน้ำยางธรรมชาติและพบพีคเล็ก ๆ ของ ZnO ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่ใส่เพื่อให้โพลีเมอร์คงรูป โดยที่เมื่อปริมาณกราฟีนออกไซด์เพิ่มมากขึ้นพีคของ ZnO จะเล็กลงเรื่อยๆ เนื่องจากถูกพิดของกราฟีนออกไซด์ บดบัง และในรูปที่ 4.10 (a) พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นพีคที่เป็นแถบกว้างเนื่องจากการเลี้ยวเบนของยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นอสัณฐานแต่เมื่อเพิ่มกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ (b-d) พบว่าพีคแคบกว่าของโพลีเมอร์ธรรมชาติแสดงว่ามีความเป็นผลึกที่สูงขึ้น ซึ่งความเป็นผลึกเกิดจากลักษณะของกราฟีน-ออกไซด์ เนื่องจากระนาบของวัฏภาคของกราฟีนมีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal [35]

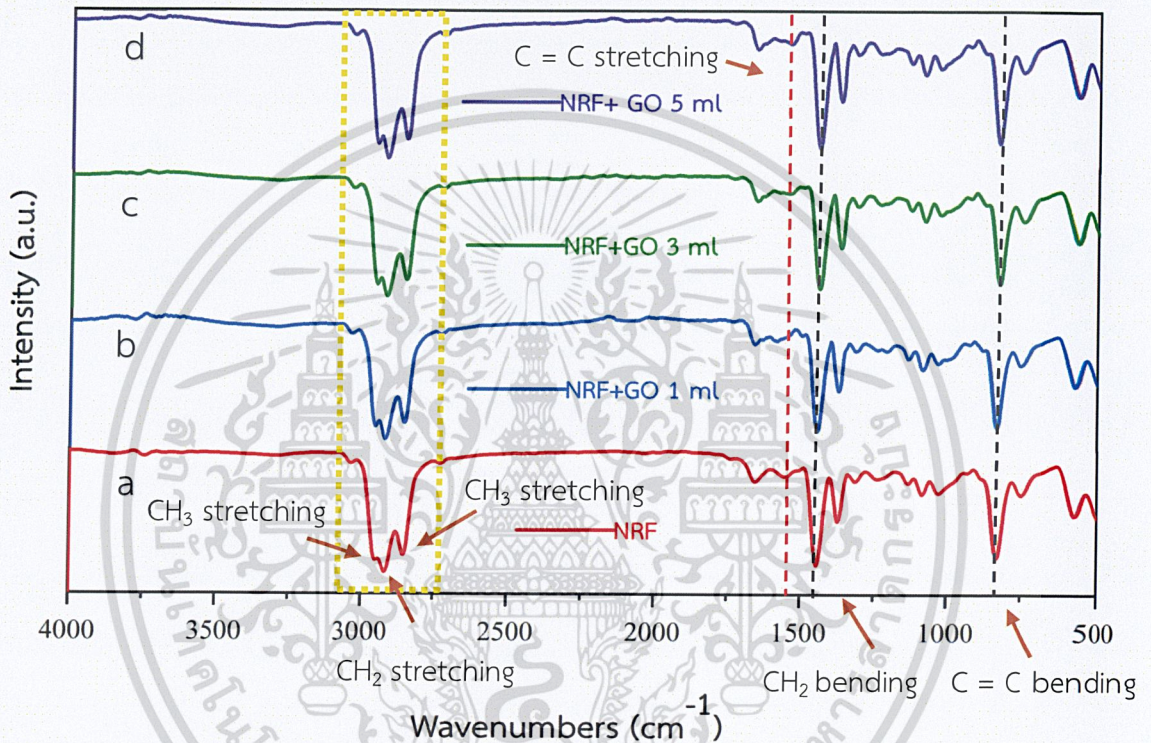
จากรูปที่ 4.11 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 3 มิลลิลิตรคงที่กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่า (a - d) จะปรากฏแถบเอกลักษณ์ของน้ำยางธรรมชาติและพบพีคเล็ก ๆ ของ ZnO ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่ใส่เพื่อให้โพลีเมอร์คงรูป ในรูปที่ 4.11 (a) พบว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นพีคที่เป็นแถบกว้างเนื่องจากการเลี้ยวเบนของยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นอสัณฐานและเมื่อเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ (b - d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าพีคมีความใกล้เคียงกับของโพลีเอทิลีนเนื่องจากสื่อนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่ทำให้กราฟเปลี่ยนแปลง

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโพลีเอทิลีน

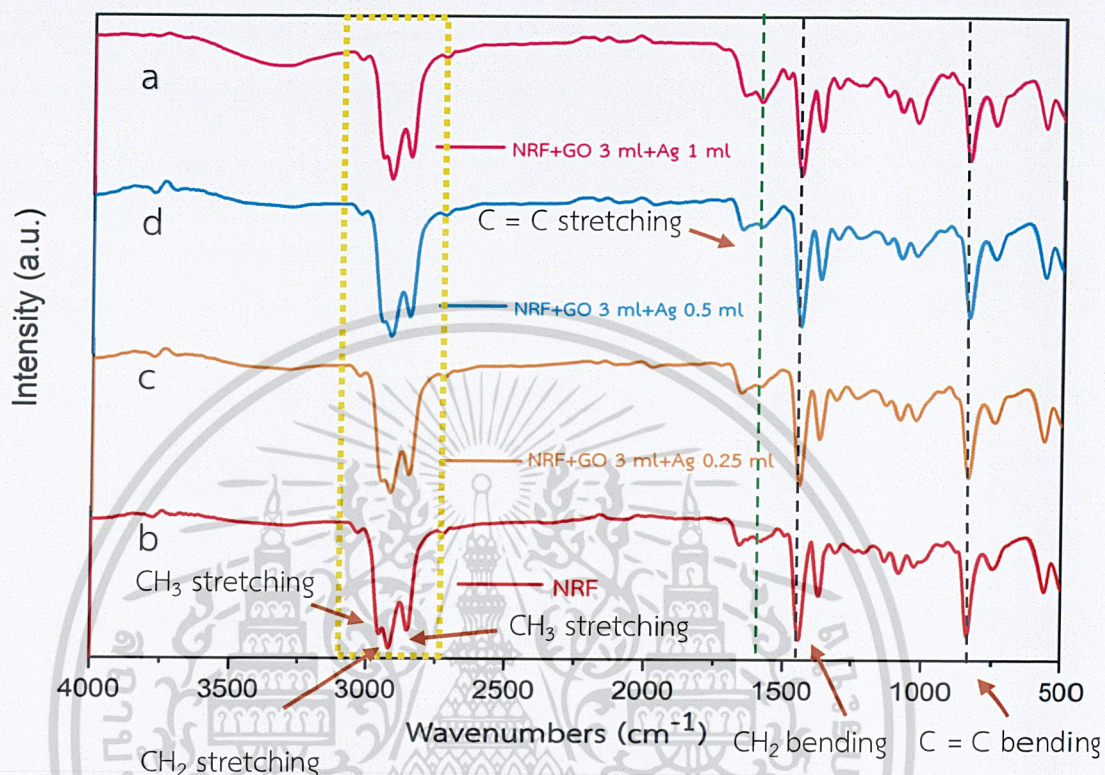
การวิเคราะห์ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ และโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 – 4.13



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) NRF (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 และ (d) NRF+GO-5

จากรูปที่ 4.12 พบว่า (a) โพลีเอทิลีน จะแสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ ช่วงแรกที่เลขคลื่นประมาณ  $3600-3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของพันธะออกซิเจนต่อกับไฮโดรเจน (O-H Stretching) จากน้ำ บริเวณเลขคลื่นประมาณ  $2952\text{ cm}^{-1}$  และ  $2848\text{ cm}^{-1}$  เป็นช่วงการสั่นแบบยืดของ  $\text{CH}_3$  ( $\text{CH}_3$  Stretching) ใกล้เคียงกับการสั่นแบบยืดของ  $\text{CH}_2$  ( $\text{CH}_2$  Stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $2919\text{ cm}^{-1}$  ต่อมาพบแถบการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ  $1660\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ  $\text{C}=\text{C}$  ( $\text{C}=\text{C}$  Stretching) จากนั้นจะพบแถบการสั่นแบบงอของ  $\text{CH}_2$  ( $\text{CH}_2$  Bending) ที่ความยาวคลื่นประมาณ  $1441\text{ cm}^{-1}$  และพบแถบการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ  $833\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการสั่นแบบงอของ  $\text{C}=\text{C}$  ( $\text{C}=\text{C}$  Bending) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของโพลีเอทิลีน [36] ส่วน (b), (c), (d) ไม่ว่าจะรวมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ จะพบแถบการสั่นของโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นหลักแต่ไม่พบแถบการสั่นของกราฟีนออกไซด์ในเทคนิค FT-IR เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงในโพลีเมอร์ธรรมชาติมีปริมาณน้อยจึงถูกพิคของไอโซพรีนในยางธรรมชาติบดบัง [37]



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) NRF (b) NRF+GO-3+Ag-0.25 (c) NRF+GO-3+Ag-0.5 และ (d) NRF+GO-3+Ag-1

จากรูปที่ 4.13 พบว่า (a) โพลีเมอร์ธรรมชาติ จะแสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ ช่วงแรกที่เลขคลื่นประมาณ  $3600-3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของพันธะออกซิเจนต่อกับไฮโดรเจน (O-H Stretching) จากน้ำ บริเวณเลขคลื่นประมาณ  $2955\text{ cm}^{-1}$  และ  $2852\text{ cm}^{-1}$  เป็นช่วงการสั่นแบบยืดของ  $\text{CH}_3$  ( $\text{CH}_3$  Stretching) ใกล้เคียงกับการสั่นแบบยืดของ  $\text{CH}_2$  ( $\text{CH}_2$  Stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $2916\text{ cm}^{-1}$  ต่อมาพบแถบการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ  $1650\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ  $\text{C}=\text{C}$  ( $\text{C}=\text{C}$  Stretching) จากนั้นจะพบแถบการสั่นแบบงอของ  $\text{CH}_2$  ( $\text{CH}_2$  Bending) ที่ความยาวคลื่นประมาณ  $1438\text{ cm}^{-1}$  และพบแถบการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ  $835\text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบการสั่นแบบงอของ  $\text{C}=\text{C}$  ( $\text{C}=\text{C}$  Bending) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ [36] ส่วน (b), (c), (d) เป็นโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ จะพบแถบการสั่น

ของโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นหลักเนื่องจากปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ใส่ในโพลีเมอร์ธรรมชาติเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

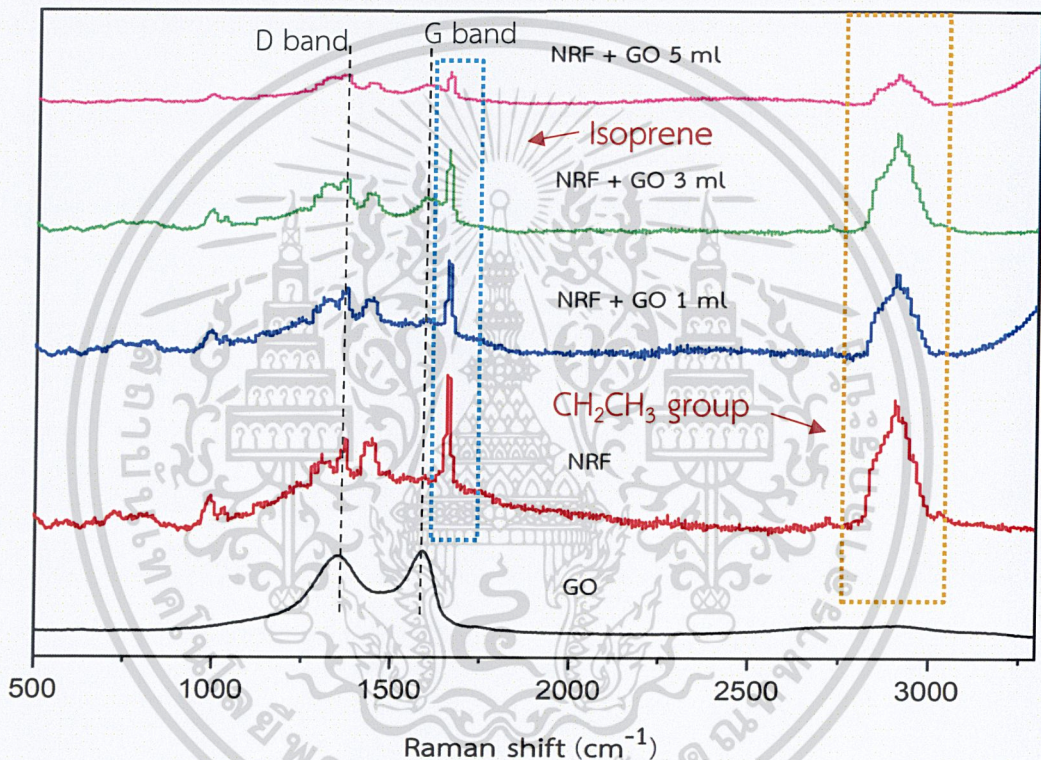
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีปริมาณน้อยทำให้แถบการสั่นของยางธรรมชาติไปบดบังแถบการสั่นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจึงทำให้ไม่ปรากฏแถบการสั่นของกราฟอนุภาคซิลเวอร์นาโนในเทคนิค FT-IR

#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน

เทคนิครามานเป็นเทคนิคใช้หาความยาวพันธะในโมเลกุลแบบไม่มีขีด ซึ่งจะทำให้สามารถระบุหาประเภทของสารตัวอย่างได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

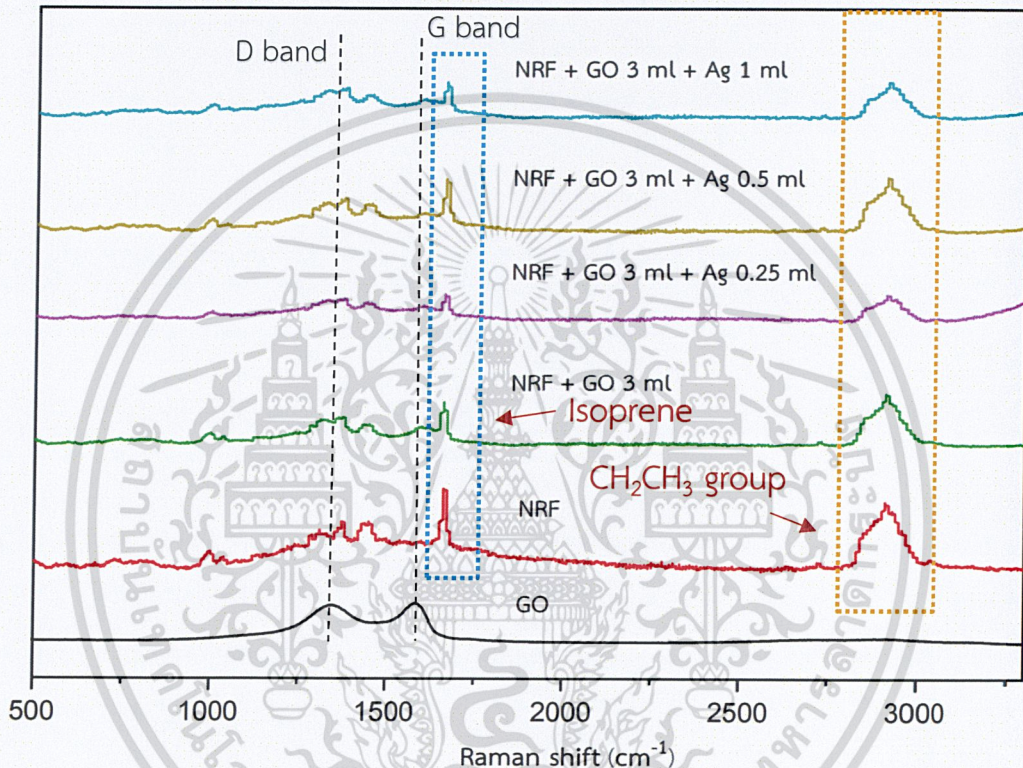
ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน (Raman spectroscopy) ของกราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่งแสดงผลการศึกษาดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของโพลียาธรรมชาติและโพลียาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 โฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์แสดงพีค isoprene ที่ตำแหน่งประมาณ  $1665\text{ cm}^{-1}$  พีค  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  group ที่ตำแหน่งประมาณ  $2916\text{ cm}^{-1}$  พีค D band ที่ตำแหน่งประมาณ  $1374\text{ cm}^{-1}$  และ G band ที่ตำแหน่งประมาณ  $1598\text{ cm}^{-1}$  [38] เปรียบเทียบโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์พบว่า พีคของ isoprene และ  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  group ลดลงแต่แถบของ D band กว้างขึ้น เนื่องจาก กราฟีนออกไซด์จะเกิดความบกพร่อง (defect) และความไม่เป็นระเบียบ (disorder) จากหมู่ฟังก์ชันบริเวณผิวหน้าและขอบ ในกระบวนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ [39]



รูปที่ 4.15 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

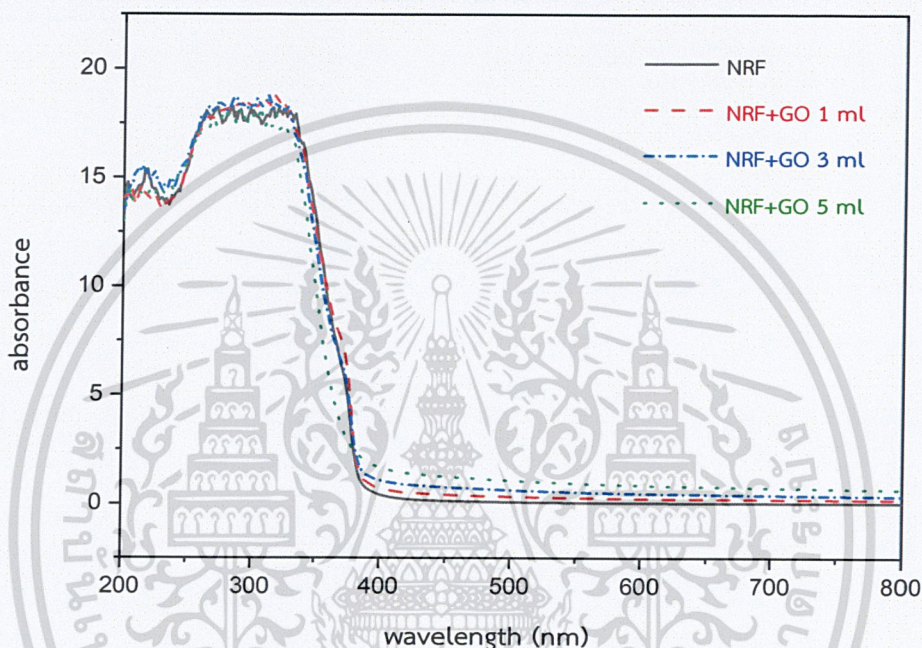
จากรูปที่ 4.15 โฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์แสดงพีค isoprene ที่ตำแหน่งประมาณ  $1666\text{ cm}^{-1}$  พีค  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  group ที่ตำแหน่งประมาณ  $2917\text{ cm}^{-1}$  พีค D band ที่ตำแหน่งประมาณ  $1375\text{ cm}^{-1}$  และ G band ที่ตำแหน่งประมาณ  $1590\text{ cm}^{-1}$  [38] เปรียบเทียบโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ พบว่า โฟมยางธรรมชาติที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์พีคของ isoprene และ  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  group ลดลงแต่แถบของ D band กว้างขึ้น เนื่องจากกราฟีนออกไซด์จะเกิดความบกพร่อง (defect) และความไม่เป็นระเบียบ (disorder) จากหมู่ฟังก์ชันบริเวณผิวหน้าและขอบในกระบวนการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟีนออกไซด์ [40] แต่ไม่ปรากฏพีคของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเนื่องจากเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่น้อยมากทำให้ไม่สามารถตรวจพบในเทคนิครามาน

#### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสง

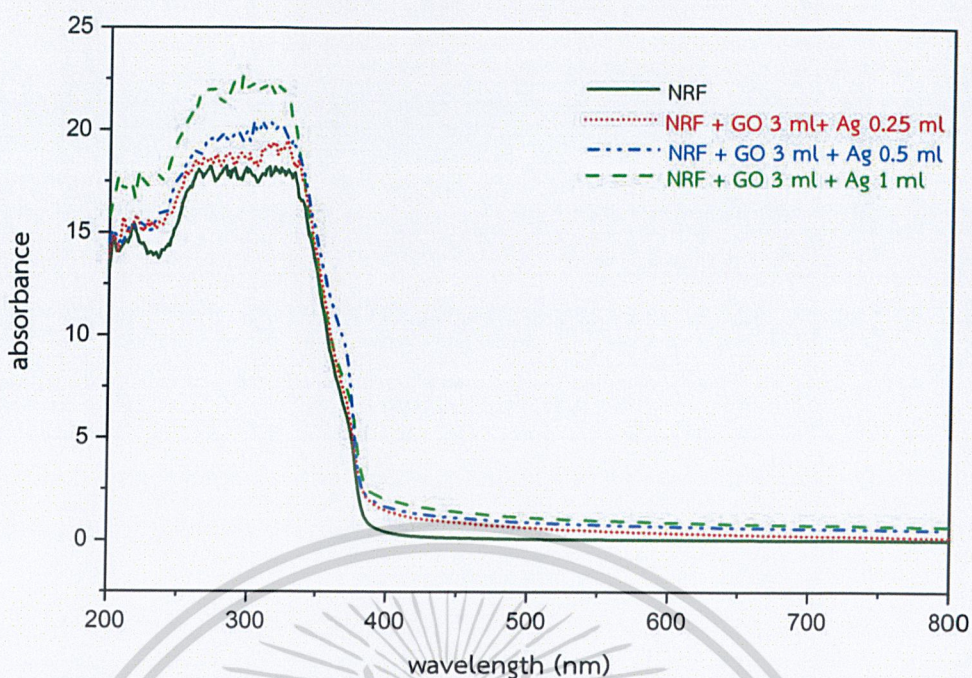
ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ของโพลีเมทริกซ์ธรรมชาติ โพลีเมทริกซ์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ และโพลีเมทริกซ์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูป 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโพลีเมทริกซ์ธรรมชาติและโพลีเมทริกซ์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 พบว่าโพลีเมทริกซ์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ มีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าโพลีเมทริกซ์ธรรมชาติ โดยโพลีเมทริกซ์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 5 มิลลิลิตรจะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุด รองลงมา คือ โพลีเมทริกซ์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ 3 มิลลิลิตรและ 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ายิ่งปริมาณกราฟีนออกไซด์เพิ่มมากขึ้นค่าการดูดกลืนแสงยิ่งเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีสีน้ำตาลดำซึ่งสามารถดูดกลืนได้ทุกสี ทำให้ยิ่งใส่ปริมาณมากยิ่งขึ้นดูดกลืนแสงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.17 พบว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ มีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติ โดย NRF+GO-5+AgNPs-1 มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด รองลงมาคือ NRF+GO-3+AgNPs-0.5 และ NRF+GO-3+AgNPs-0.25 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ายิ่งปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนเพิ่มมากขึ้นค่าการดูดกลืนแสงยิ่งเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่อัตราส่วน 1:1 อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีขนาดใหญ่ยิ่งเติมในโพลีเมอร์ปริมาณมากจำนวนอนุภาคซิลเวอร์นาโนมากจึงดูดกลืนแสงได้มาก [21]

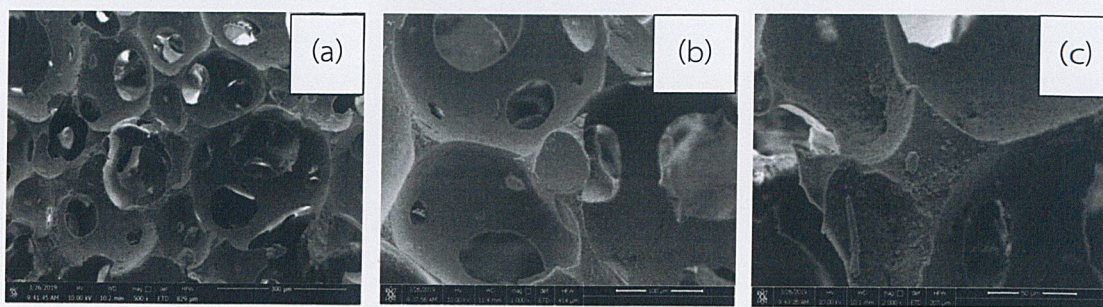
#### 4.3.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาค

##### 4.3.5.1 บริเวณพื้นผิวของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม

ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของสารตัวอย่างในระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) โดยทำการศึกษาบริเวณพื้นผิว (Surface) แสดงผลการศึกษาในรูปที่ 4.18 – 4.20

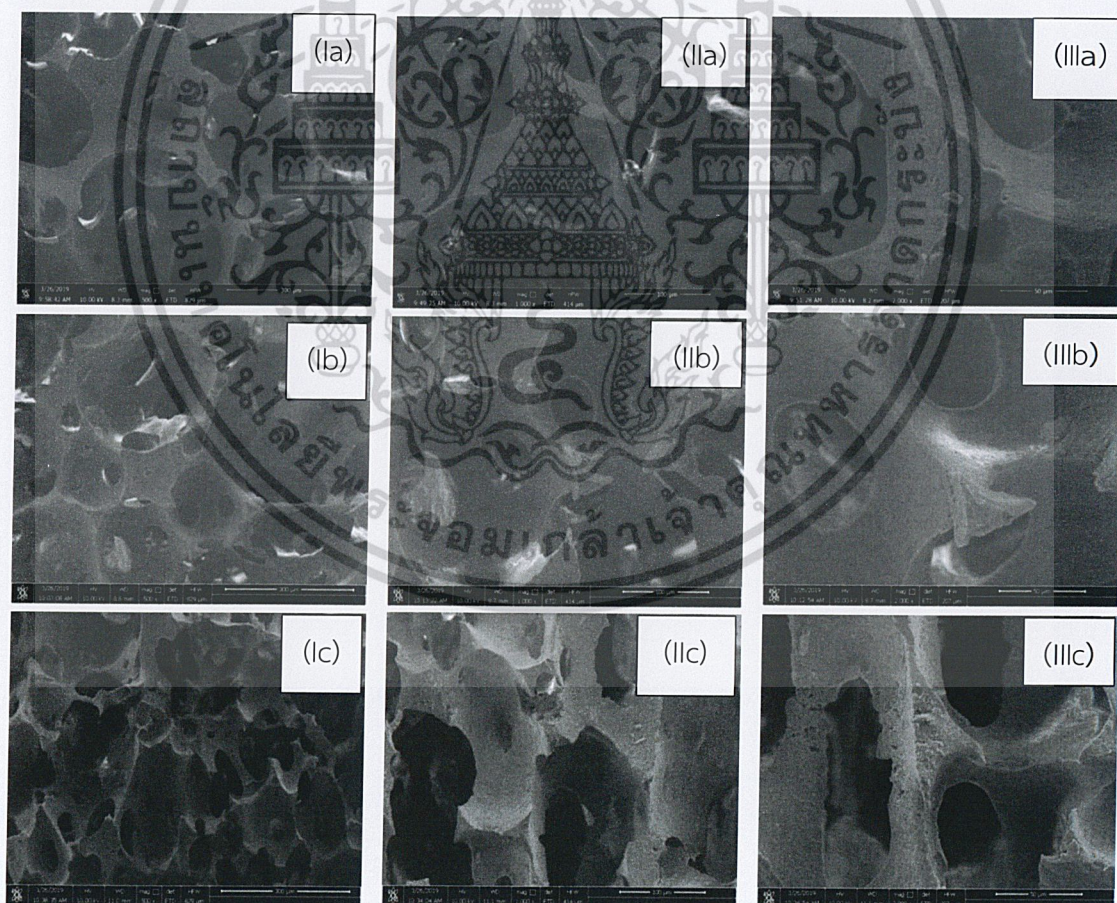
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) สัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.18 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณพื้นผิว (Surface) ของโฟมยางธรรมชาติที่กำลังขยาย (a) 500x (b) 1000x และ (c) 2000x

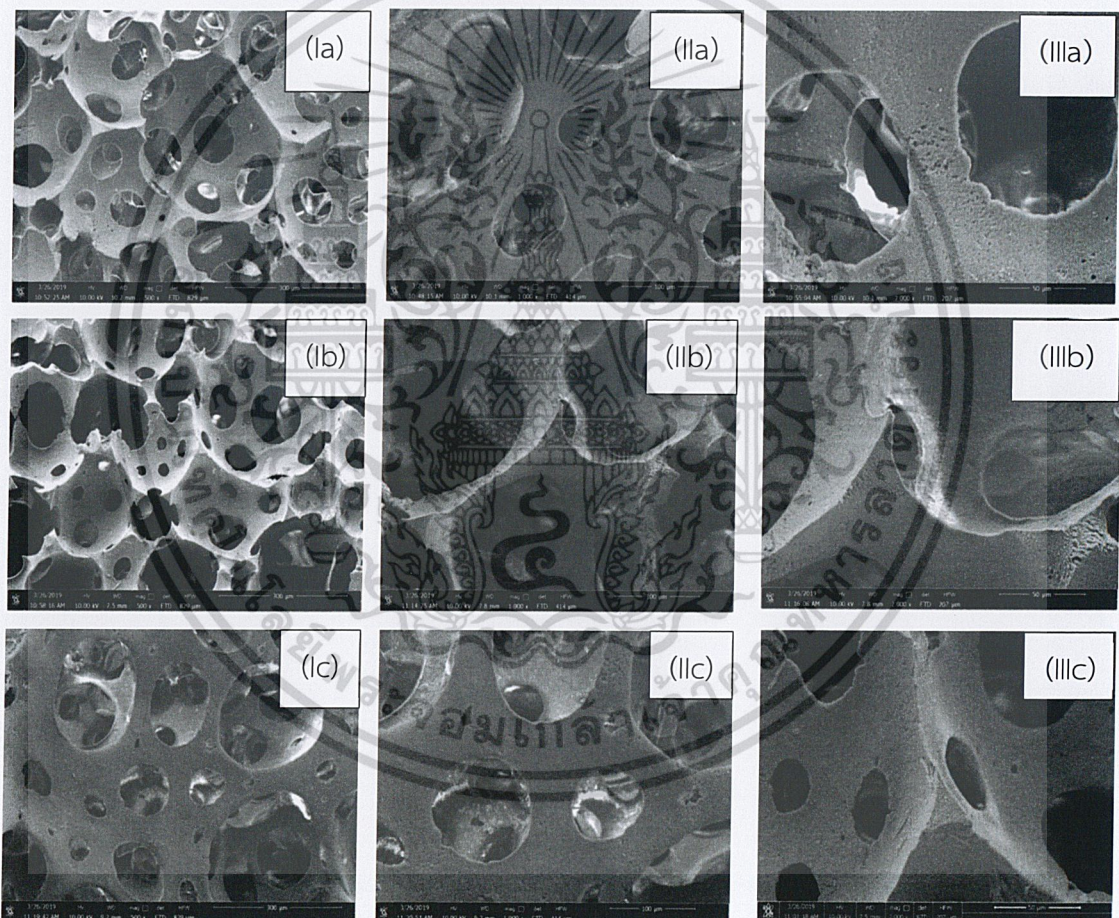
2) สัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ 1, 3 และ 5 มิลลิกรัม



รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย (I) 500x เอกสาร (II) 1000x (III) 2000x ของโฟมยางธรรมชาติผสม (a) NRF+GO-1 (b) NRF+GO-3 (c) NRF+GO-5 การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) ของโฟมยางธรรมชาติในรูปแบบที่ 4.18 พบว่าเนื้อโฟมยางมีความขรุขระ รูพรุนเป็นทรงกลมและปริมาณรูพรุนมาก เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 1 และ 3 มิลลิกรัม ดังรูปที่ 4.19 พบว่า เนื้อของโฟมยางมีความเรียบเนียนขึ้นและรูพรุนมีความกลมสม่ำเสมอและรูพรุนน้อยกว่าโฟมยางธรรมชาติแต่เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 5 มิลลิกรัม รูพรุนบิดเบี้ยวไม่เป็นทรงกลม เนื้อโฟมยางมีความขรุขระ เนื้อโฟมยางเชื่อมต่อกันไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเมื่อใส่กราฟีนออกไซด์ในปริมาณมากทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเองคล้ายกราฟิต จึงทำให้มีการกระจายตัวที่ไม่ดี

### 3) สัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิกรัมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 0.5 และ 1 มิลลิกรัม



รูปที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย (I) 500x (II) 1000x (III) 2000x ของโฟมยางธรรมชาติผสม (a) NRF+GO-3+AgNPs-0.25 (b) NRF+GO-3+AgNPs-0.5 (c) NRF+GO-3+AgNPs-1

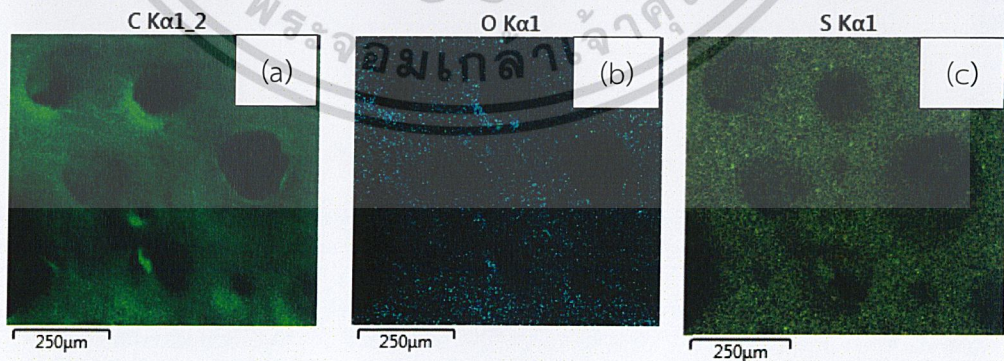
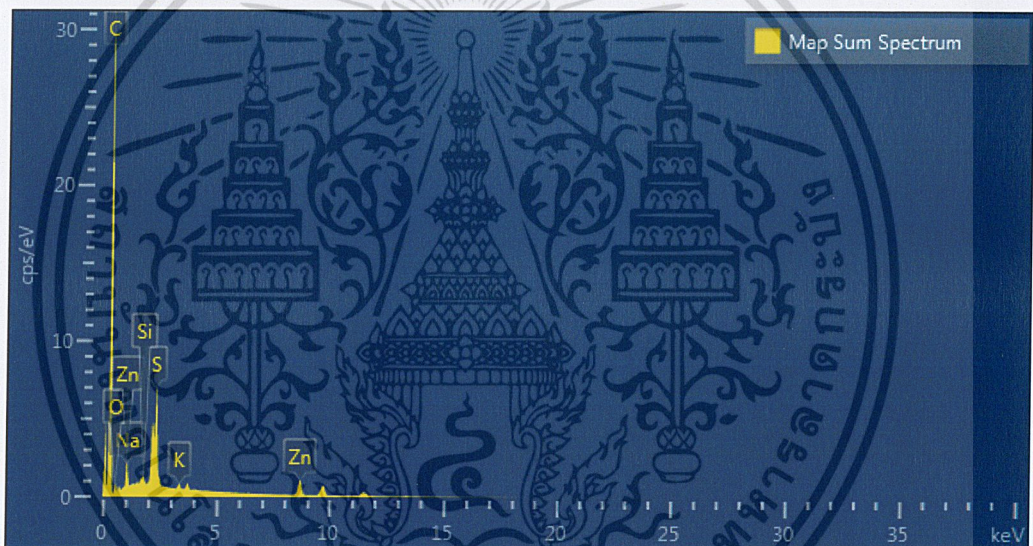
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 ผลการศึกษาภาพตัดขวางของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่เติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ จากรูป 4.20 (a) พบว่าเนื้อโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม เนื้อโพลีเมอร์เชื่อมต่อกัน แต่ (b-c) เมื่อใส่อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เนื้อโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมเกิดการเสียสภาพ ทำให้เนื้อโพลีเมอร์ภายในเกิดการเชื่อมต่อกันไม่สมบูรณ์ ทำให้รูปทรงภายในเกิดความไม่สม่ำเสมอ[40]

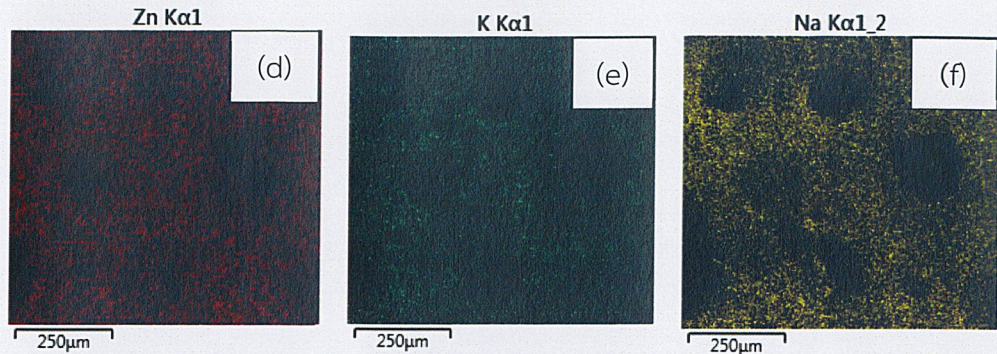
#### 4.3.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

เป็นการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิว โดยวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) ออกซิเจน (O) สังกะสี (Zn) โซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K)

##### 4.3.6.1 โพลีเมอร์ธรรมชาติ



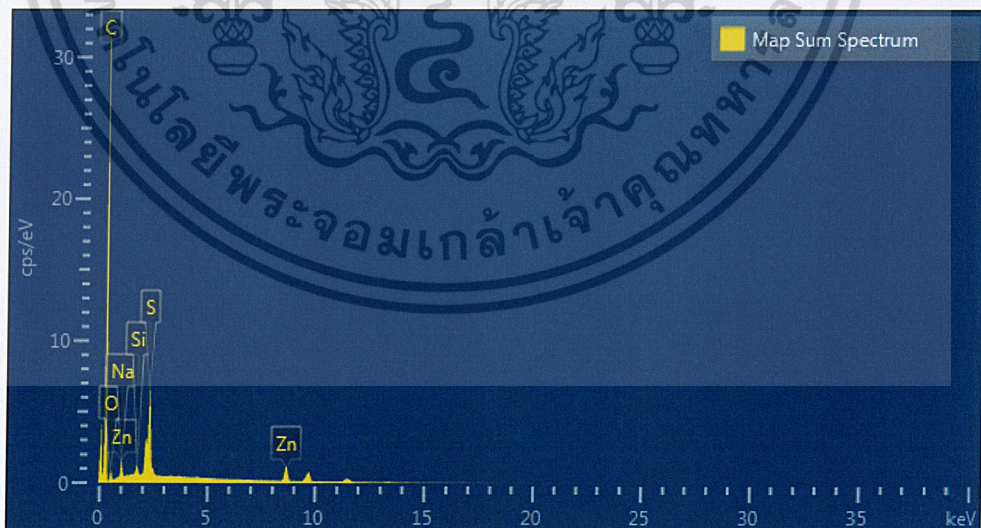
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



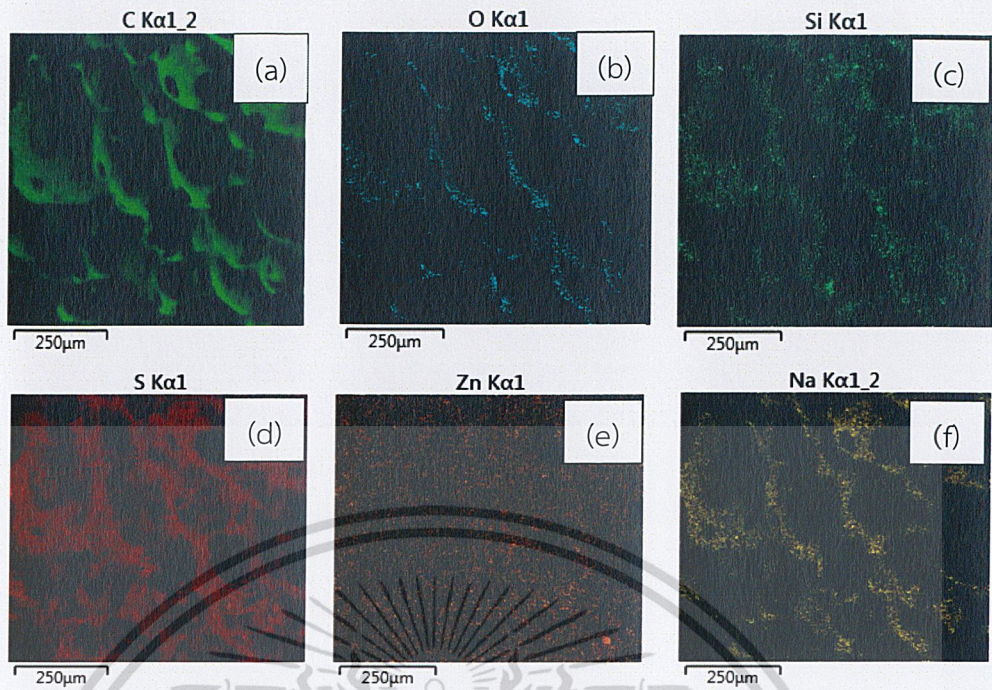
รูปที่ 4.21 แสดง EDS สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na)

จากรูปที่ 4.21 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโพลีเมอร์ธรรมชาติ ตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างทั้ง 7 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) โดยคาร์บอนมาจากโครงสร้างของยางธรรมชาติและกราฟีน ออกซิเจนมาจากออกไซด์ที่จับกับ กราฟีนและจากโครงสร้างของสารตัวเร่ง ส่วนซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) และซิลิกอน มาจากสารตัวเร่งที่ใช้ในการขึ้นรูปโพลีเมอร์ ซึ่งจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนดังภาพ (a) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจนดังภาพ (b) และธาตุซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) ดังภาพ (c), (d), (e) และ (f) ตามลำดับ แต่จากแผนที่ธาตุไม่พบการกระจายตัวของซิลิกอนเนื่องจากตรวจพบในปริมาณน้อย

#### 4.3.6.2 โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

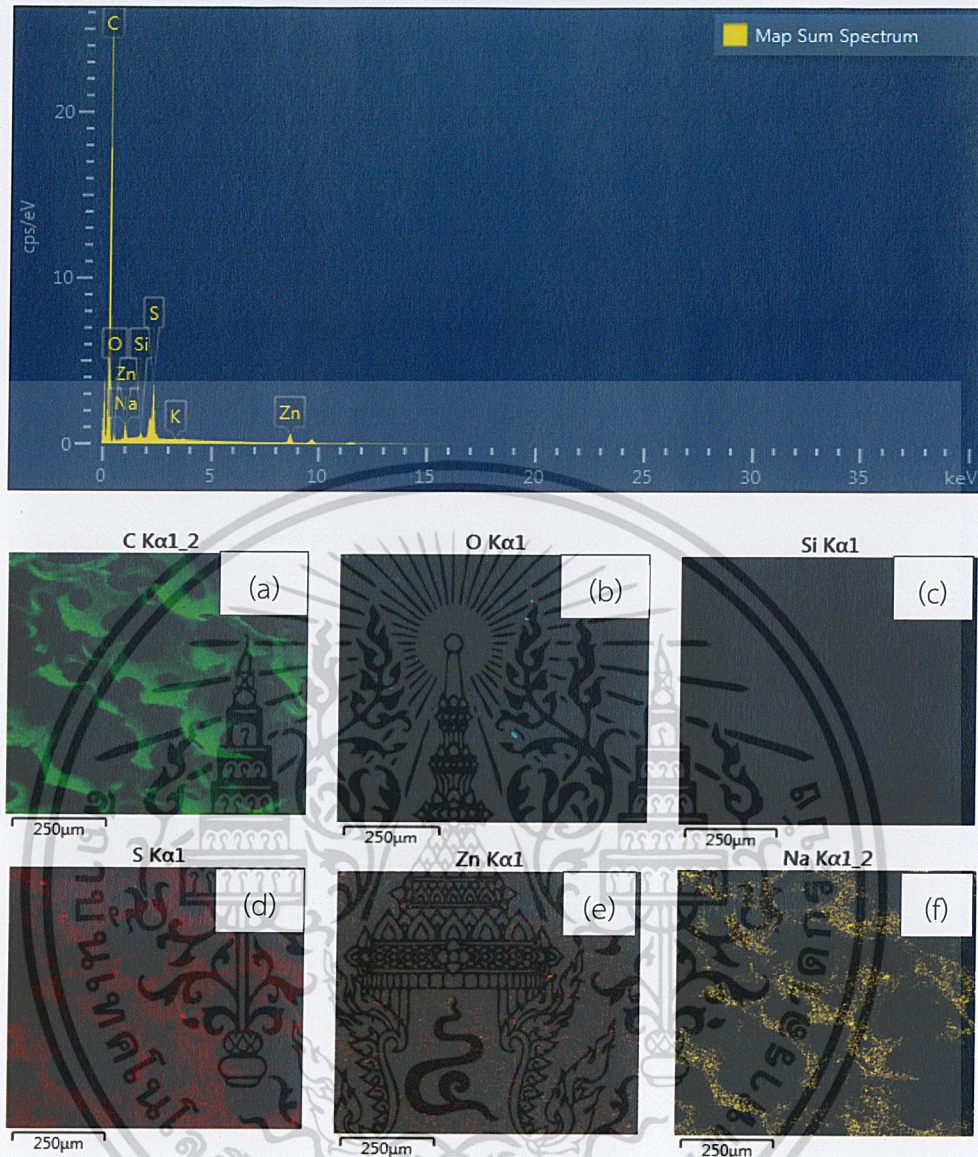


รูปที่ 4.22 แสดง EDS สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-1 และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na)

จากรูปที่ 4.22 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิกรัม ตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างทั้ง 6 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na) โดยคาร์บอนมาจากโครงสร้างของโพลีเมอร์และกราฟีน ออกซิเจนมาจากออกไซด์ที่จับกับกราฟีนและจากโครงสร้างของสารตัวเร่ง ส่วนซิลเวอร์ (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na) มาจากสารตัวเร่งที่ใช้ในการขึ้นรูปโพลีเมอร์ ซึ่งจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน ดังภาพ (a) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจนดังภาพ (b) และธาตุซิลเวอร์ (Si), ซัลเฟอร์ (S), สังกะสี (Zn), และโซเดียม (Na) ดังภาพ (c), (d), (e) และ (f) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.6.3 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร



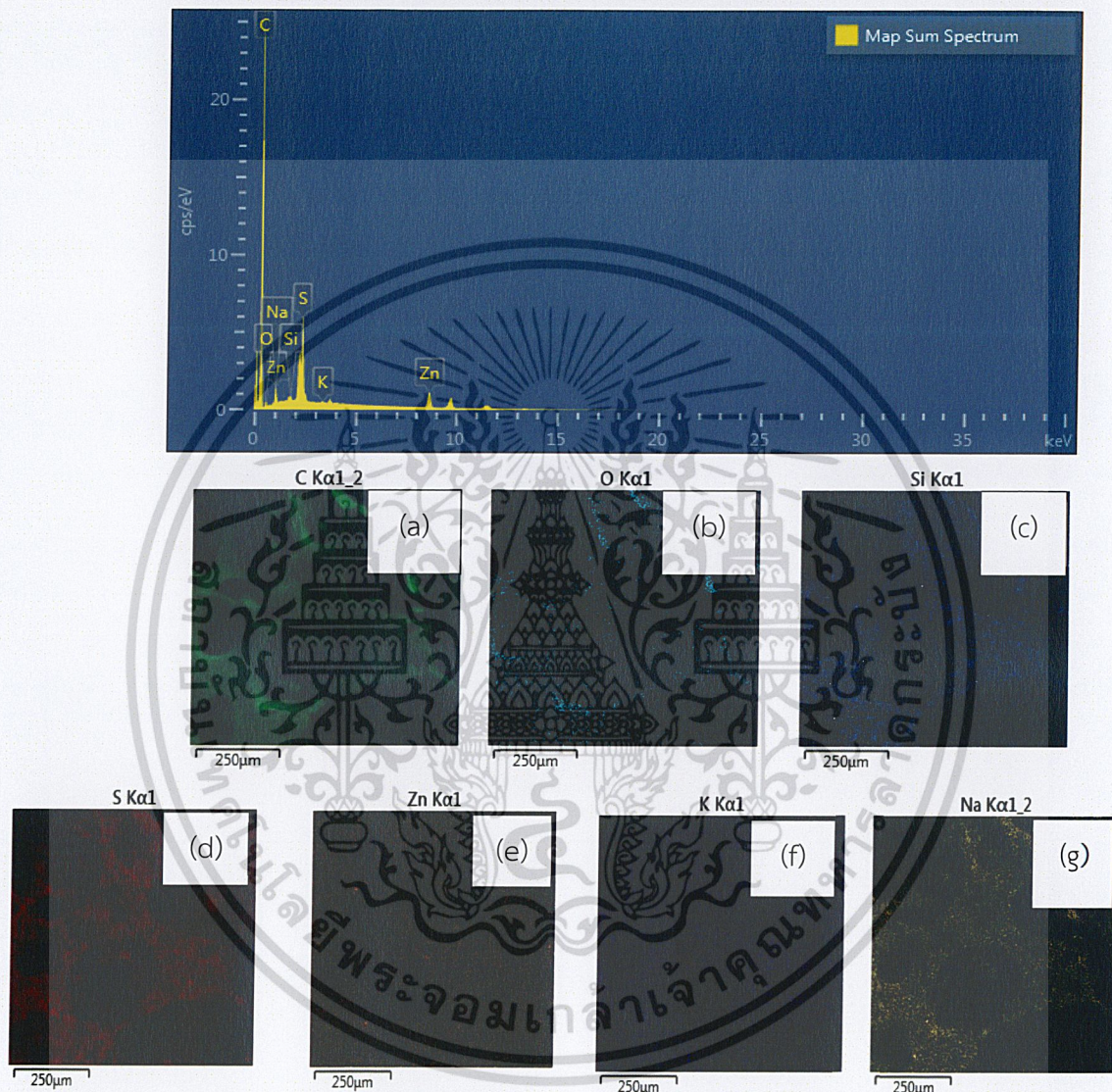
รูปที่ 4.23 แสดง EDS สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-3 และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na)

จากรูปที่ 4.23 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร ตรวจสอบวิเคราะห์พบธาตุนับรวมของตัวอย่างทั้ง 7 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) โดยคาร์บอนมาจากโครงสร้างของยางธรรมชาติและกราฟีน ออกซิเจนมาจากออกไซด์ที่จับกับกราฟีนและจากโครงสร้างของสารตัวเร่ง ส่วนซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) มาจากสารตัวเร่งที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมยาง ซึ่งจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน ดังภาพ (a) การกระจายตัวเอกสารนี้เป็นเอกลักษณ์สำหรับโรงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของธาตุออกซิเจนดังภาพ (b) และธาตุซิลิกอน (Si), ซัลเฟอร์ (S), สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na) ดังภาพ (c), (d), (e) และ (f) ตามลำดับ แต่ไม่พบแผนที่ธาตุโพแทสเซียม (K) เนื่องจากปริมาณน้อย

#### 4.3.6.4 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร



รูปที่ 4.24 แสดง EDS สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NR+GO-5 และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na)

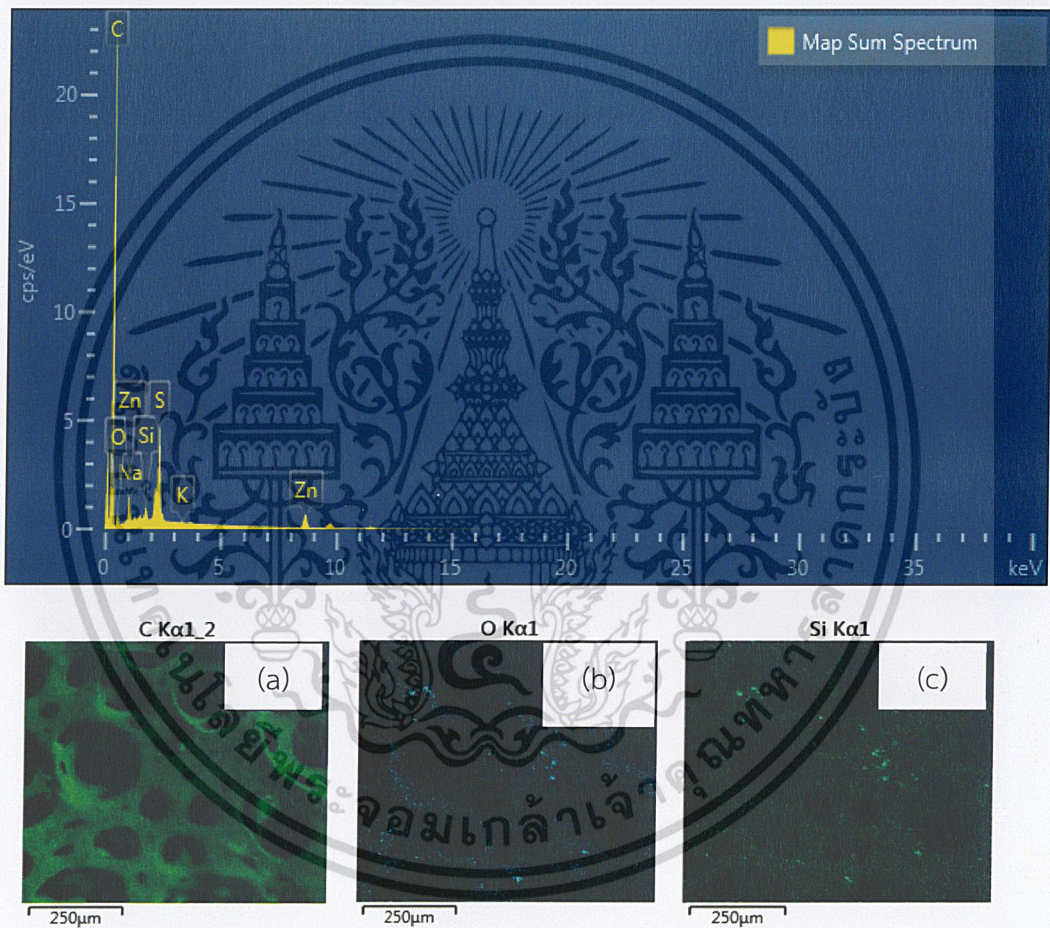
จากรูปที่ 4.24 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร กับ ตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างทั้ง 7 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) โดยคาร์บอนมาจากโครงสร้างของยางธรรมชาติและกราฟีน ออกซิเจนมาจากออกไซด์ที่จับกับกราฟีนและจากโครงสร้างของสารตัวเร่ง ส่วน

ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

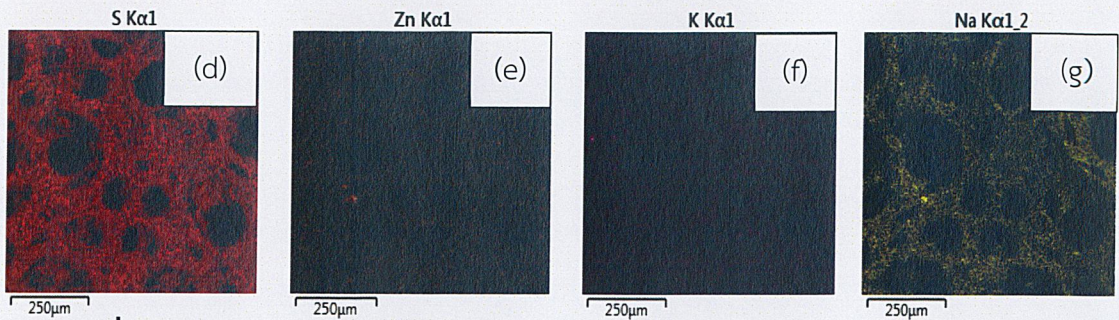
ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) มาจากสารตัวเร่งที่ใช้ในการขึ้นรูปโพลีเมอร์ ซึ่งจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนดังภาพ (a) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจนดังภาพ (b) และธาตุซิลิกอน (Si), ซัลเฟอร์ (S), สังกะสี (Zn), โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) ดังภาพ (c), (d), (e), (f) และ (g) ตามลำดับ

#### 4.3.6.5 โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิเมตรกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

##### 0.25 มิลลิเมตร



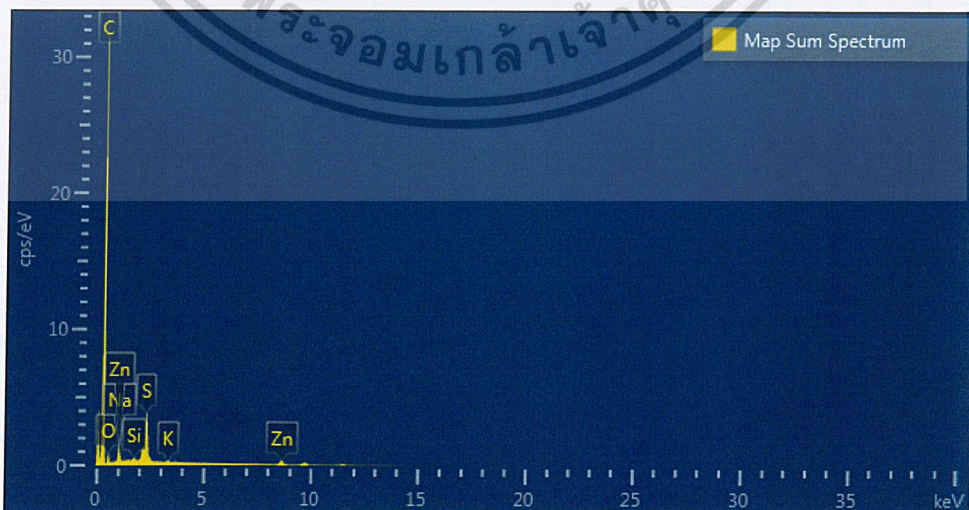
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



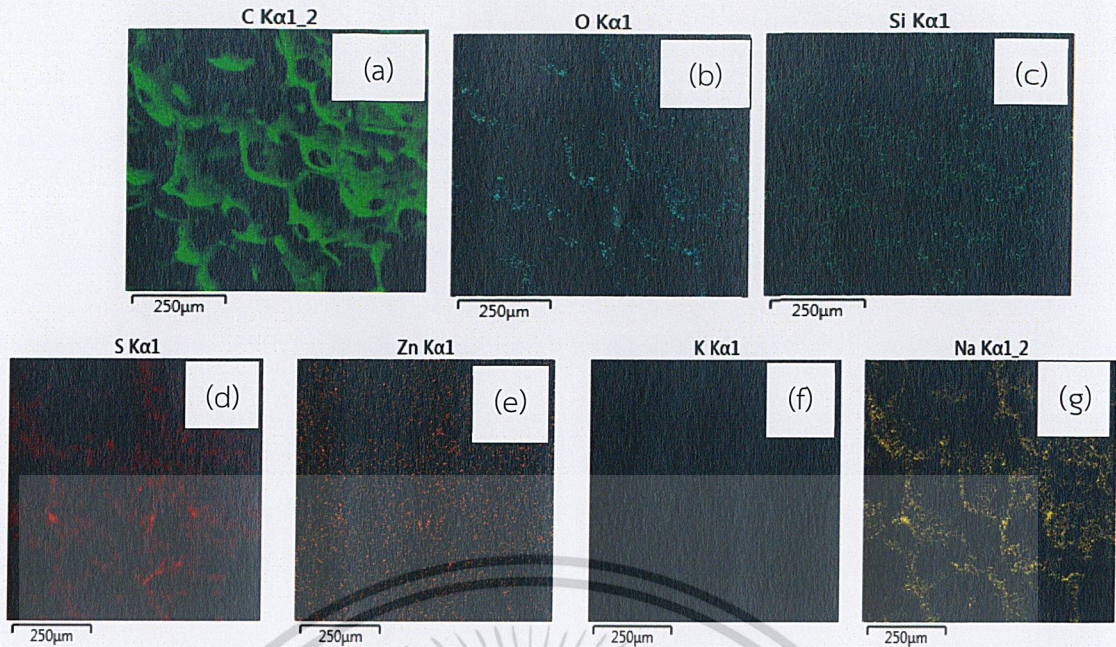
จากรูปที่ 4.25 แสดง EDS สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-3+AgNPs-0.25 และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na)

จากรูปที่ 4.25 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 มิลลิลิตร ตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างทั้ง 7 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) โดยคาร์บอนมาจากโครงสร้างของยางธรรมชาติและกราฟีน ออกซิเจนมาจากออกไซด์ที่จับกับกราฟีนและจากโครงสร้างของสารตัวเร่ง ส่วนซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) มาจากสารตัวเร่งที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมยาง ซึ่งจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนดังภาพ (a) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจนดังภาพ (b) และธาตุซิลิกอน (Si), ซัลเฟอร์ (S), สังกะสี (Zn), โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) ดังภาพ (c), (d), (e), (f) และ (g) ตามลำดับ แต่ในเทคนิคนี้ไม่สามารถตรวจพบอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้เนื่องจากมีปริมาณน้อย

#### 4.3.6.6 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตรกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 มิลลิลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

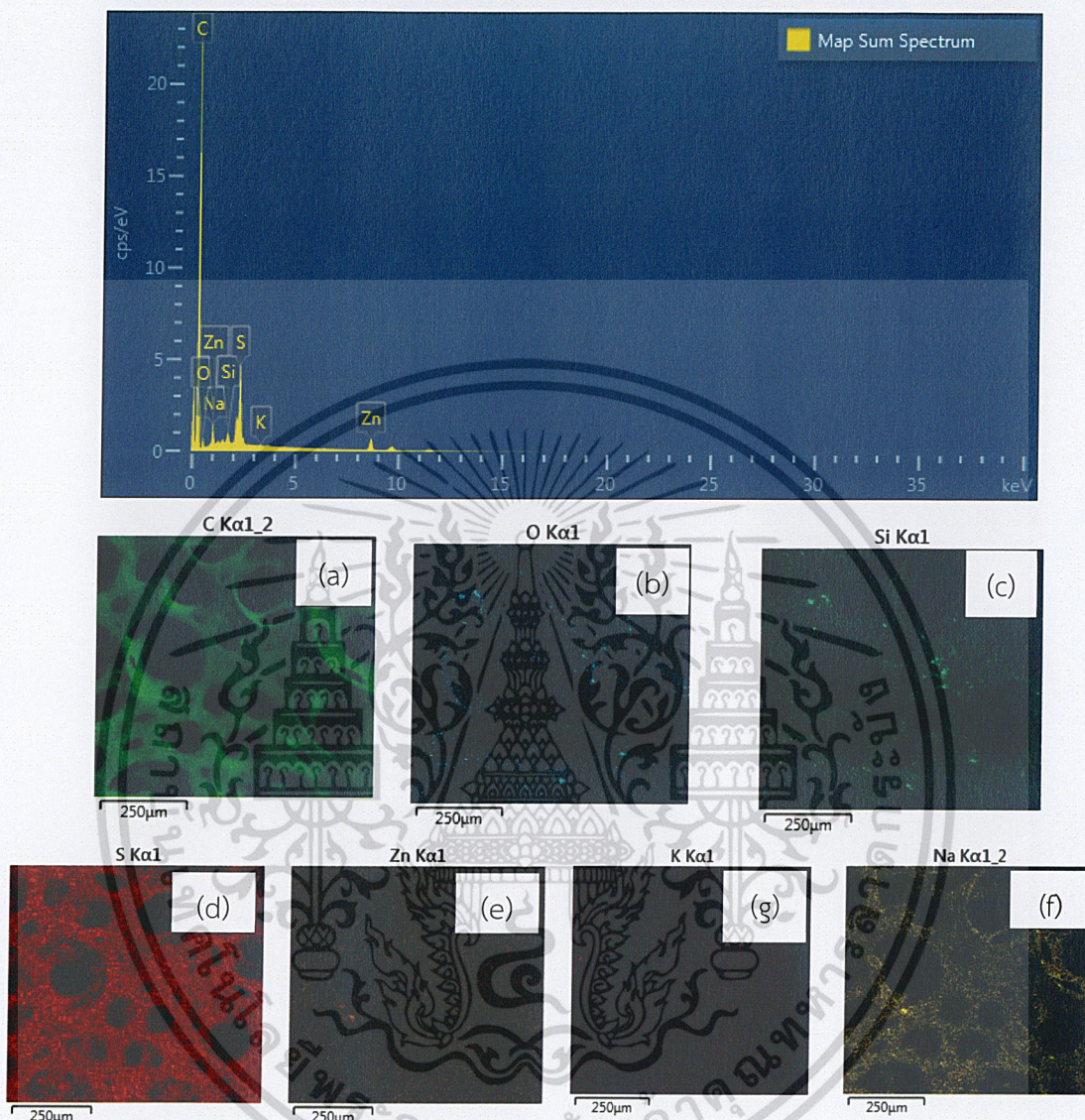


รูปที่ 4.26 แสดง EDS สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-3+AgNPs-0.5 และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na)

จากรูปที่ 4.26 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิกรัม กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 มิลลิกรัม ตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างทั้ง 7 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) โดยคาร์บอนมาจากโครงสร้างของยางธรรมชาติและกราฟีน ออกซิเจนมาจากออกไซด์ที่จับกับกราฟีนและจากโครงสร้างของสารตัวเร่ง ส่วนซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) มาจากสารตัวเร่งที่ใช้ในการขึ้นรูปโพลีเมอร์ ซึ่งจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนดังภาพ (a) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจนดังภาพ (b) และธาตุซิลิกอน (Si), ซัลเฟอร์ (S), สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) ดังภาพ (c), (d), (e), (f) และ (g) ตามลำดับ แต่ในเทคนิคนี้ไม่สามารถตรวจพบอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้เนื่องจากมีปริมาณน้อย

#### 4.3.6.7 โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตรกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

##### 1 มิลลิลิตร



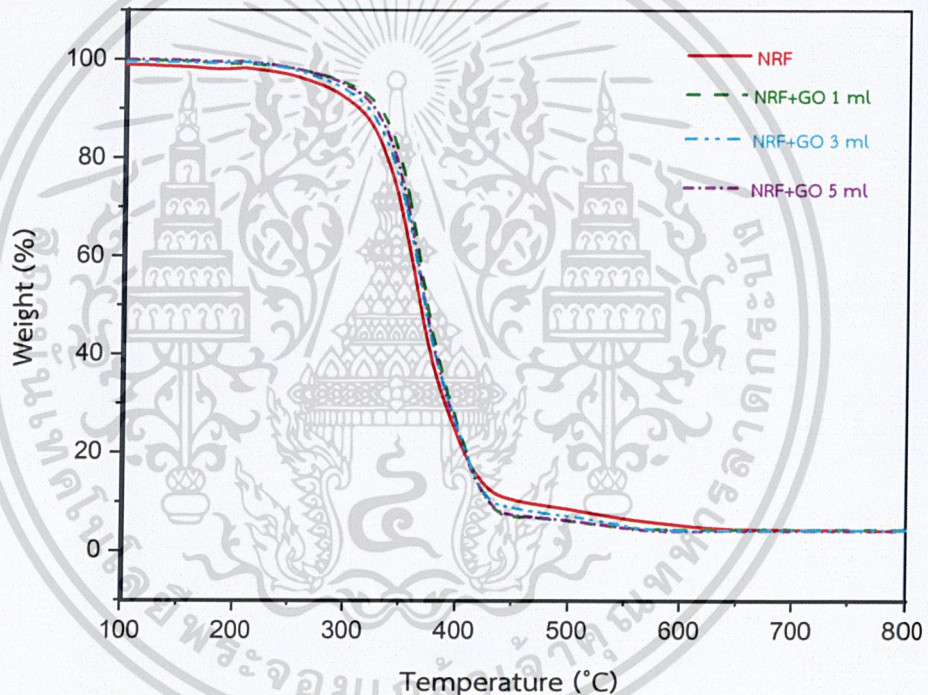
รูปที่ 4.27 แสดง EDS สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุใน NRF+GO-3+AgNPs-1 และแผนที่ธาตุ แสดงการกระจายตัวของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na)

จากรูปที่ 4.27 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตรกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร ตรวจสอบพบธาตุบนผิวของตัวอย่างทั้ง 7 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na) โดยคาร์บอนมาจากโครงสร้างของยางธรรมชาติและกราฟีน ออกซิเจนมาจากออกไซด์ที่จับกับกราฟีนและจากโครงสร้างของสารตัวเร่ง ส่วนซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และโซเดียม (Na) มาจากสารตัวเร่งที่ใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขึ้นรูปโพลีเมอร์ ซึ่งจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนดังภาพ (a) การกระจายตัวของธาตุออกซิเจนดังภาพ (b) และธาตุซิลิกอน (Si), ซัลเฟอร์ (S), สังกะสี (Zn), โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) ดังภาพ (c), (d), (e), (f) และ (g) ตามลำดับ แต่ในเทคนิคนี้ไม่สามารถตรวจพบอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้เนื่องจากมีปริมาณน้อย

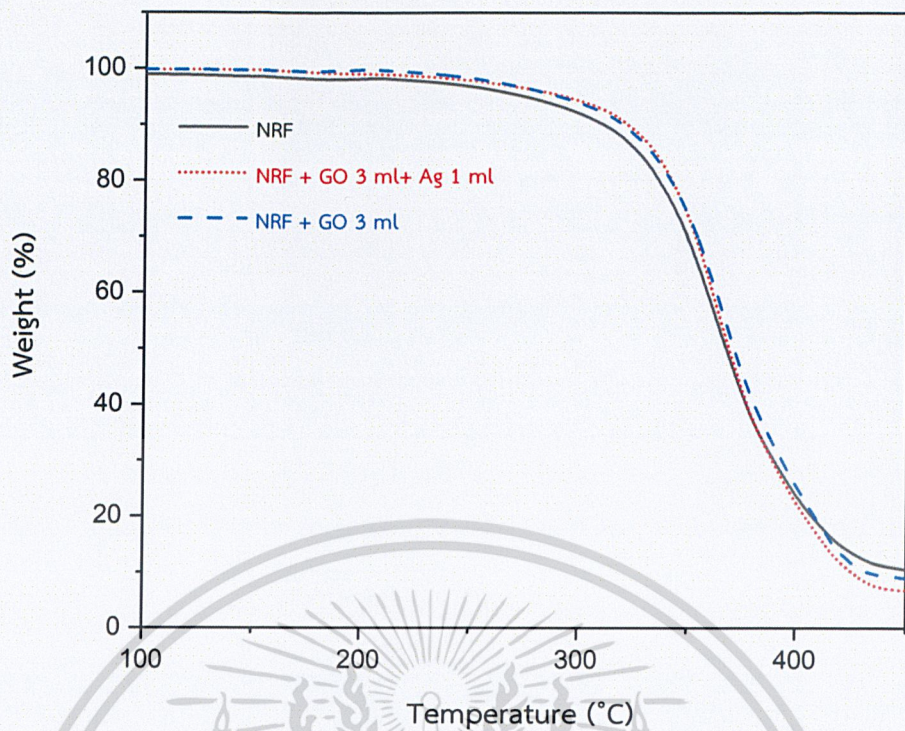
#### 4.3.7 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อน

4.3.7.1 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโนในแต่ละช่วงอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิการวิเคราะห์อยู่ในช่วง  $25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $500^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งผลการวิเคราะห์โพลีเมอร์ธรรมชาติผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นการสูญเสีย น้ำหนักของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (a) NRF เปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 (d) NRF+GO-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



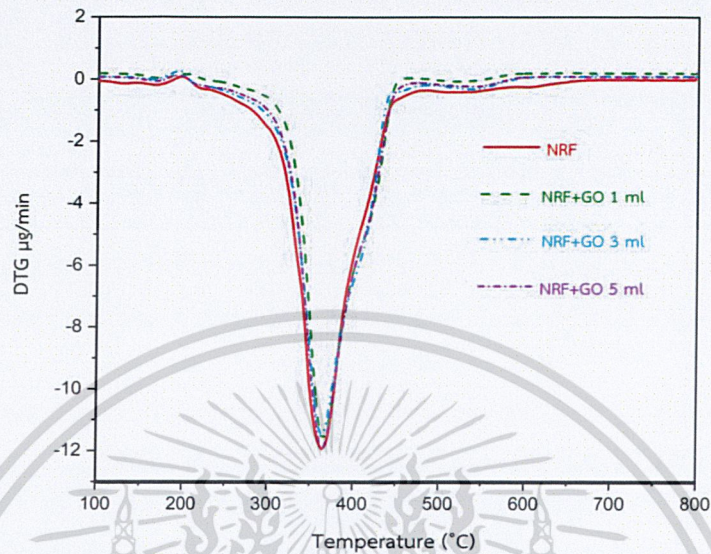
รูปที่ 4.29 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นการสูญเสีย น้ำหนักของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (a) NRF เปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม (b) NRF+GO-3+AgNPs-1

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม

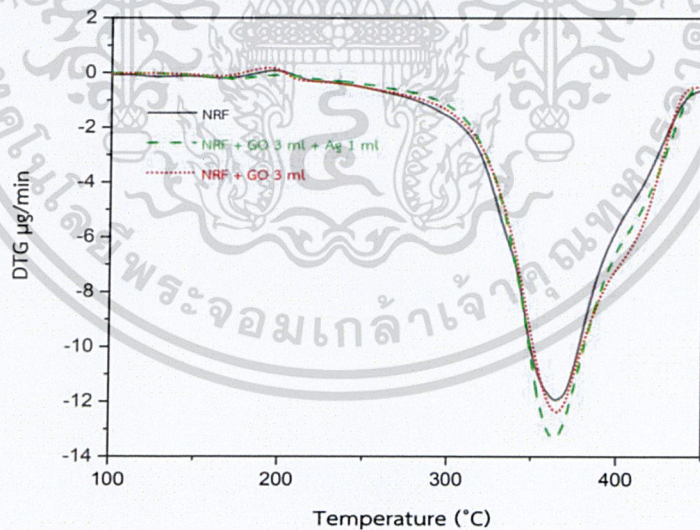
รูปแบบของโพลีเมอร์ธรรมชาติ	อุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม (°C)
NRF	364.21
NRF+GO-1	365.31
NRF+GO-3	364.54
NRF+GO-5	364.54
NRF+GO-3+AgNPs-1	363.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (derivative thermogravimetric analysis, DTG) เป็นการวิเคราะห์อัตราการสูญเสียมวลของกราฟีนออกไซด์และอนุภาคอนุภาคซิลเวอร์นาโนเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ DTG จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นอัตราการสูญเสียมวลของโพลีเมอร์ชนิดที่ไม่มีสารตัวเติม (a) NRF เปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ชนิดผสม (b) NRF+GO-1 (c) NRF+GO-3 (d) NRF+GO-5



รูปที่ 4.31 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ DTG จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นอัตราการสูญเสียมวลของโพลีเมอร์ชนิดที่ไม่มีสารตัวเติม (a) NRF เปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ชนิดผสม (b) NRF+GO-3+AgNPs-1

จากรูปที่ 4.28 และตารางที่ 4.1 พบว่าโพลีเมอร์ชนิดและโพลีเมอร์ชนิดผสมกราฟีน ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ มีลักษณะทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน โดยโพลีเมอร์ชนิด (NRF) มีราคา ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวอยู่ที่  $364.21^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นช่วงเอกลักษณ์เฉพาะในการสลายตัวของไอโซพรีนที่เป็นโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ ส่วนโพลียาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร (NRF+GO-1) มีอุณหภูมิการสลายตัวเฉลี่ยเท่ากับ  $365.31^{\circ}\text{C}$  โพลียาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร (NRF+GO-3) มีอุณหภูมิการสลายตัวเฉลี่ยเท่ากับ  $364.54^{\circ}\text{C}$  โพลียาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร (NRF+GO-5) มีอุณหภูมิการสลายตัวเฉลี่ยเท่ากับ  $364.54^{\circ}\text{C}$  [41]

จากรูปที่ 4.30 กราฟ DTG พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ  $180^{\circ}\text{C}$  เกิดการสลายตัวของน้ำและสิ่งเจือปน และที่อุณหภูมิประมาณ  $230^{\circ}\text{C}$  เกิดการสลายตัวของน้ำภายในโครงสร้าง และที่อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $364-365^{\circ}\text{C}$  เกิดการสลายตัวของไอโซพรีนที่เป็นโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ ซึ่งผลที่ได้จาก DTG สอดคล้องกับผลจาก TGA ในรูปที่ 4.28

จากรูปที่ 4.29 และตารางที่ 4.1 พบว่าโพลียาธรรมชาติและโพลียาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีลักษณะทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน โดยโพลียาธรรมชาติ (NRF) มีอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวอยู่ที่  $364.21^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นช่วงเอกลักษณ์เฉพาะในการสลายตัวของไอโซพรีนที่เป็นโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติส่วนโพลียาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตรกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร (NRF+GO-3-AgNPs-1) มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่  $363.74^{\circ}\text{C}$  [41]

จากรูปที่ 4.31 กราฟ DTG พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ  $180^{\circ}\text{C}$  เกิดการสลายตัวของน้ำและสิ่งเจือปน และที่อุณหภูมิประมาณ  $230^{\circ}\text{C}$  เกิดการสลายตัวของน้ำภายในโครงสร้าง และที่อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $363^{\circ}\text{C}$  เกิดการสลายตัวของไอโซพรีนที่เป็นโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ ซึ่งผลที่ได้จาก DTG สอดคล้องกับผลจาก TGA ในรูปที่ 4.29

#### 4.3.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

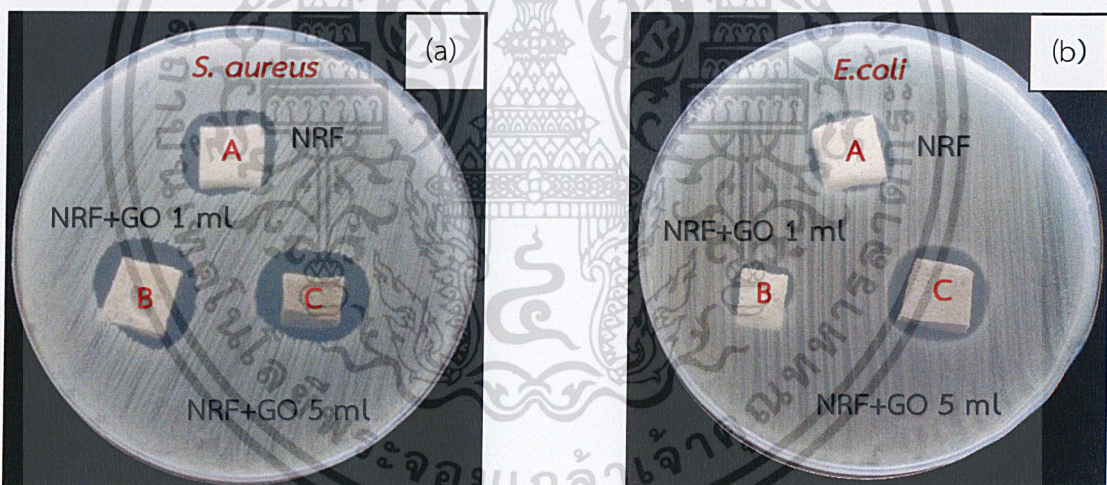
การทดสอบยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบโดยวิธี Agar disc diffusion โดยใช้เชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ เชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923) หรือเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*Escherichia coli* 25922) โดยแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบมีจำนวนทั้งหมด  $1 \times 10^8$  cfu/g (Colony forming unit) ซึ่งการวัดผลการทดสอบทำได้โดยการวัดรัศมีของโซนยับยั้ง (Inhibition zone) ในหน่วยมิลลิเมตร (mm) โดยโพลียาธรรมชาติ และโพลียาธรรมชาติผสมที่ใช้ในการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีทั้งหมด 7 ชนิด ดังต่อไปนี้

- โพลียาธรรมชาติ (NRF)
- โพลียาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $2 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 1 ml)
- โพลียาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml)

- โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $1 \times 10^{-3}$  phr (NRF + GO 5 ml)
- โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $5 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml + AgNPs 0.25 ml)
- โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $6 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml + AgNPs 0.5 ml)
- โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $1 \times 10^{-3}$  phr (NRF+GO 3 ml + AgNPs 1 ml)

#### 4.3.8.1 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

จากการศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโฟมยางธรรมชาติผสมด้วยวิธี Agar disc diffusion โดยใช้เชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) ซึ่งเงื่อนไขในการศึกษาที่ 1 ประกอบด้วย (A) โฟมยางธรรมชาติ (B) โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร (C) โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร ซึ่งแสดงรัศมีของโซนยับยั้ง (Inhibition Zone) รูปที่ 4.32



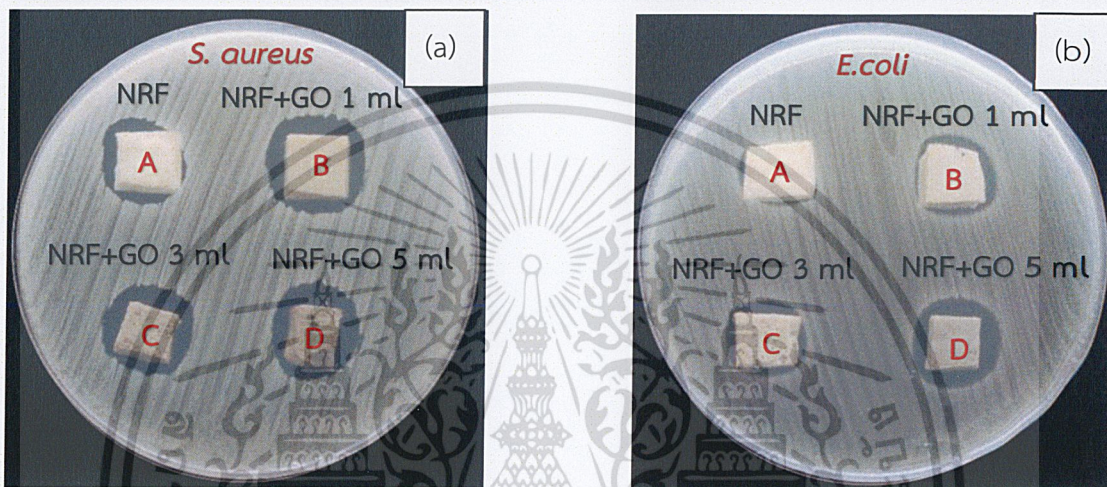
รูปที่ 4.32 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสม (a) *S. aureus* และ (b) *E. coli*

จากรูปที่ 4.32 (a) แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง A คือ โฟมยางธรรมชาติ จะสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ เนื่องจากมีรัศมีของโซนยับยั้งปรากฏ โดยตัวอย่าง B คือ โฟมยางธรรมชาติผสมกับกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 14 มิลลิเมตร ตัวอย่าง C คือ โฟมยางธรรมชาติผสมกับกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 15 มิลลิเมตร ต่อไปเป็น

การศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) รูปที่ 4.31 (b) ตัวอย่าง A และ B จะปรากฏรัศมีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบเป็นบริเวณแคบ ดังนั้นความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับตัวอย่าง C จะปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 13 มิลลิเมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบในเงื่อนไขการศึกษาที่ 1 สรุปได้ว่าตัวอย่าง A B และ C จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแกรมลบ

เงื่อนไขในการศึกษาที่ 2 ประกอบด้วย (A) โฟมายาธรรมชาติ (B) โฟมายาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิกรัม (C) โฟมายาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิกรัม (D) โฟมายาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิกรัม ซึ่งแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดดังรูปที่ 4.33

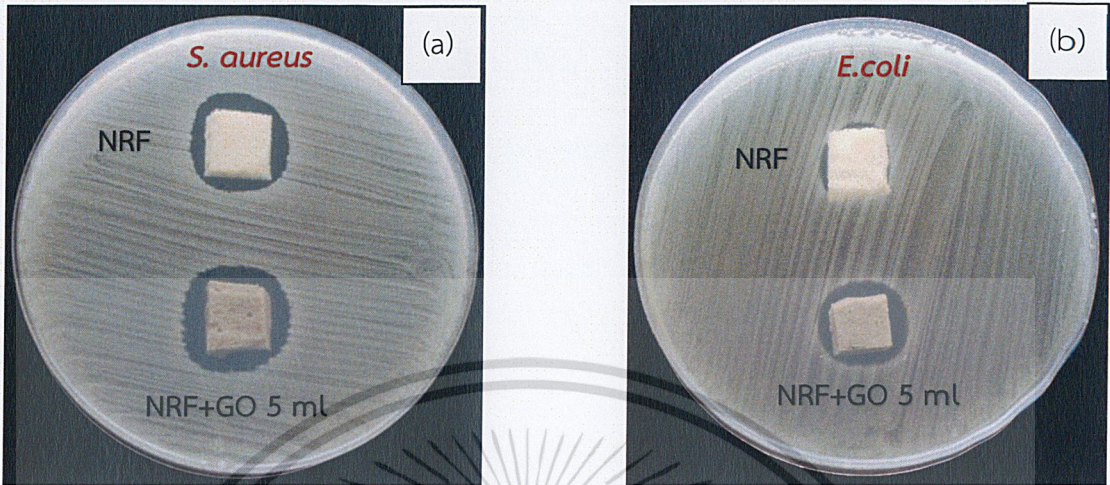


รูปที่ 4.33 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบของโฟมายาธรรมชาติและโฟมายาธรรมชาติผสม (a) *S. aureus* และ (b) *E. coli*

จากเงื่อนไขการศึกษาที่ 2 รูปที่ 4.33 (a) แสดงให้เห็นการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง A คือ โฟมายาธรรมชาติ จะมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ โดยตัวอย่าง B คือ โฟมายาธรรมชาติผสมกับกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิกรัม ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 13.5 มิลลิเมตร ตัวอย่าง C คือ โฟมายาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิกรัม ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 14 มิลลิเมตร ตัวอย่าง D โฟมายาธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิกรัม ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 15 มิลลิเมตร ต่อมาเป็นการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) รูปที่ 4.32 (b) พบว่าตัวอย่าง A B และ C ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งที่มีบริเวณแคบกว่าตัวอย่าง D โดยตัวอย่าง D ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 13 มิลลิเมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบในเงื่อนไขการศึกษาที่ 2 สรุปได้ว่าโฟมายาธรรมชาติที่มีการเติม กราฟีนออกไซด์ จะปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งที่เป็นบริเวณกว้างกว่าโฟมายาธรรมชาติปกติ โดยเฉพาะในเชื้อแบคทีเรียแกรมลบจะปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งเป็นบริเวณกว้างกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขการศึกษาที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วย (A) โฟมยางธรรมชาติ (B) โฟมยางธรรมชาติผสม กราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร ซึ่งแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสม (a) *S. aureus* และ (b) *E. coli*

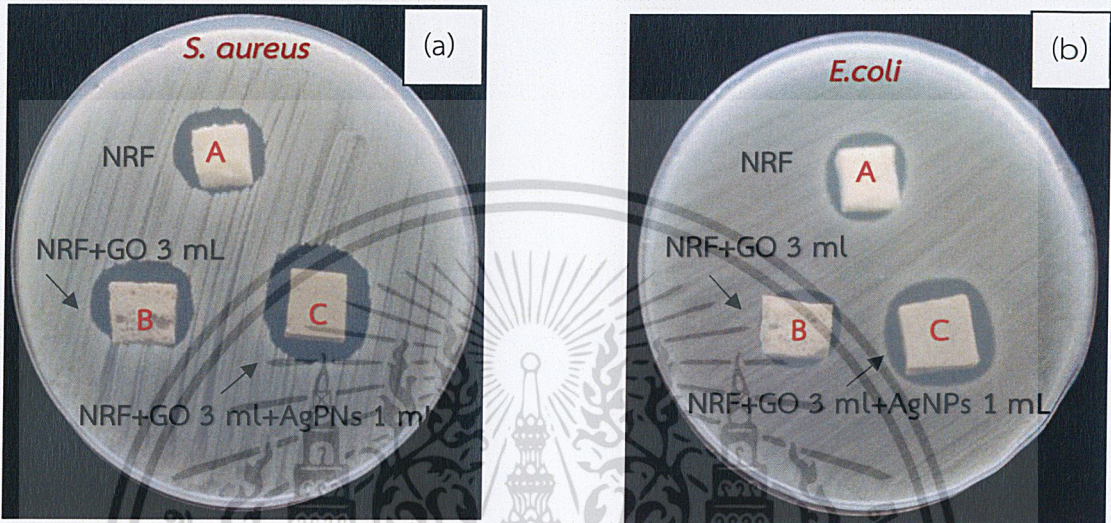
จากเงื่อนไขที่ 3 รูปที่ 4.34 (a) แสดงให้เห็นการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง A คือ โฟมยางธรรมชาติจะสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ เนื่องจากมีรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 13 มิลลิเมตร ตัวอย่าง B โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 14 มิลลิเมตรและเมื่อทำการศึกษการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) พบว่า รัศมีของโซนยับยั้งของตัวอย่าง A และ B มีขนาดที่ลดลง โดยที่ตัวอย่าง A มีรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 10.5 มิลลิเมตร และตัวอย่าง B มีรัศมีของโซนยับยั้งขนาดประมาณ 13 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบในเงื่อนไขการศึกษาที่ 3 สรุปได้ว่าตัวอย่าง A และ B จะมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแกรมลบ

จากเงื่อนไขการศึกษาทั้ง 1 2 และ 3 จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่เป็นโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ จะมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบที่ไม่เท่ากันซึ่งสังเกตได้จากรัศมีของโซนยับยั้งที่ปรากฏในเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) ทั้งนี้เป็นเพราะ ในแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบมีองค์ประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์ที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างชั้นของเพปทิโดไกลแคนในแบคทีเรียแกรมลบบางกว่าของแกรมบวกมาก และมีพันธะเพปไทด์ที่เชื่อมระหว่างเส้นเพปทิโดไกลแคนน้อยกว่า และไม่มีพันธะของ teichoic acid ที่เพิ่มความแข็งแรงดังนั้นผนังเซลล์ของพวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกรมลบจึงแข็งแรงน้อยกว่าแกรมบวกมากจึงทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในแกรมลบต่ำกว่าในเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก [25]

เงื่อนไขการศึกษาที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วย (A) โฟมยางธรรมชาติ (B) โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร (C) โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร ซึ่งแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดดังรูปที่ 4.35

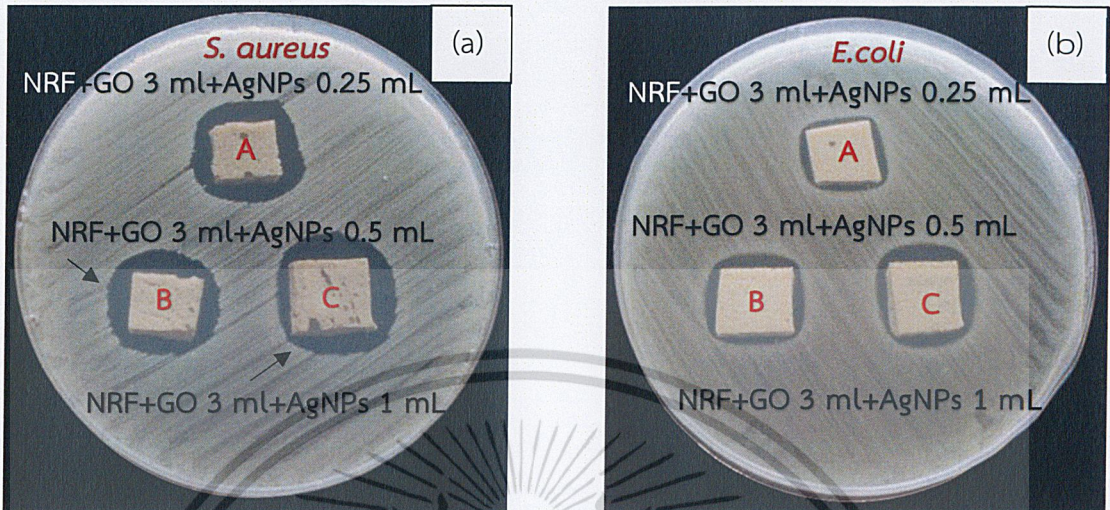


รูปที่ 4.35 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติผสม (a) *S. aureus* และ (b) *E. coli*

จากเงื่อนไขที่ 4 รูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) ซึ่งจากการทดสอบพบว่าตัวอย่าง A คือ โฟมยางธรรมชาติจะสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้เนื่องจากมีรัศมีของโซนยับยั้งปรากฏ โดยตัวอย่าง B คือ โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งประมาณ 13 มิลลิเมตร ตัวอย่าง C คือ โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งประมาณ 14 มิลลิเมตร ต่อมาเป็นการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) พบว่าตัวอย่าง A และ B ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งที่เป็นบริเวณแคบเมื่อเทียบกับตัวอย่าง C จะปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งประมาณ 13 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบในเงื่อนไขการศึกษาที่ 4 พบว่าโฟมยางธรรมชาติที่มีการเติม กราฟีนออกไซด์ร่วมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบที่สูงกว่าโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์ ซึ่งจะสังเกตได้จากบริเวณของรัศมีโซนยับยั้งที่มีบริเวณที่กว้าง

เงื่อนไขการศึกษาที่ 5 ซึ่งประกอบไปด้วย (A) โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 มิลลิลิตร (B) โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 มิลลิลิตร (C) โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์รัศมีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร ซึ่งแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดดังรูปที่ 4.36



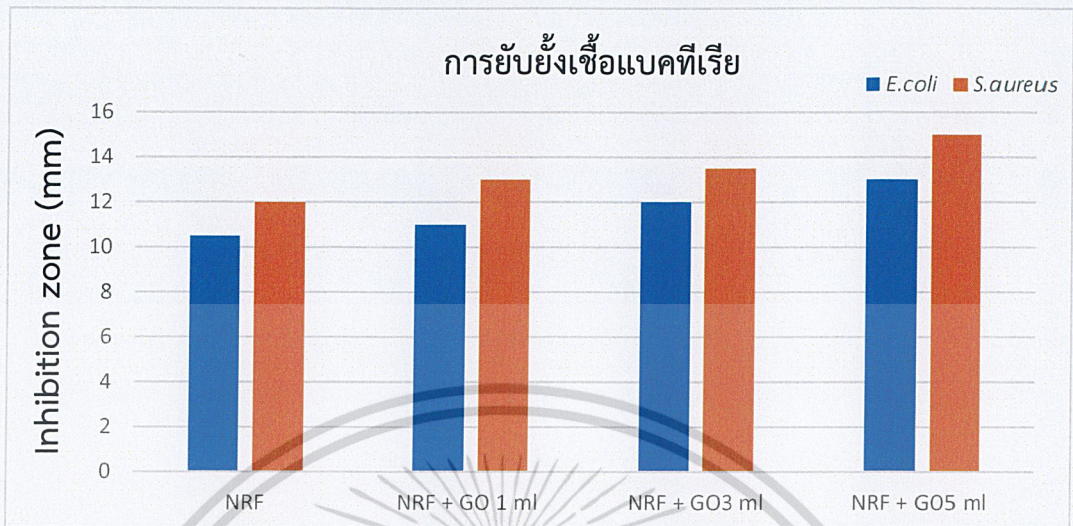
รูปที่ 4.36 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบของโพลียเอทิลีนออกไซด์และโพลียเอทิลีนออกไซด์ดิมิทธิลอีเทอร์ (a) *S. aureus* และ (b) *E. coli*

จากเงื่อนไขที่ 5 รูปที่ 4.36 (a) แสดงให้เห็นการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง A คือ โพลียเอทิลีนออกไซด์ดิมิทธิลอีเทอร์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 มิลลิลิตร ตัวอย่าง B คือ โพลียเอทิลีนออกไซด์ดิมิทธิลอีเทอร์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 มิลลิลิตร และ ตัวอย่าง C คือ โพลียเอทิลีนออกไซด์ดิมิทธิลอีเทอร์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร โดยตัวอย่าง A B และ C มีรัศมีของโซนยับยั้งปรากฏเป็นบริเวณกว้างและมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการศึกษการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) พบว่าตัวอย่าง A B และ C มีบริเวณขนาดของรัศมีโซนยับยั้งที่แคบลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบในเงื่อนไขการศึกษาที่ 5 พบว่าโพลียเอทิลีนออกไซด์ดิมิทธิลอีเทอร์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่สูง โดยเฉพาะในแบคทีเรียแกรมบวกจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียที่ดีเยี่ยม

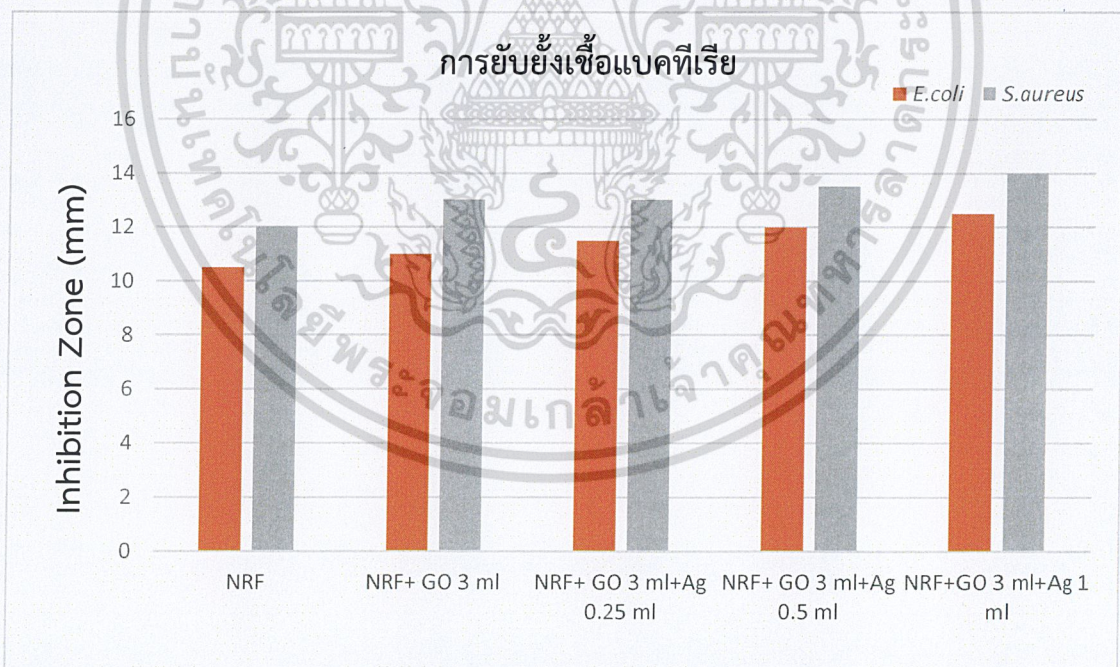
จากเงื่อนไขการศึกษาทั้ง 4 และ 5 พบว่าโพลียเอทิลีนออกไซด์และโพลียเอทิลีนออกไซด์ดิมิทธิลอีเทอร์ที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์จะมีรัศมีการยับยั้งที่มีบริเวณแคบกว่าทั้งในเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และแกรมลบ (*E. coli*) เมื่อเทียบกับโพลียเอทิลีนออกไซด์ดิมิทธิลอีเทอร์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนแล้วจะจะมีรัศมีโซนยับยั้งที่เป็นบริเวณกว้างกว่านั้น ทั้งนี้ก็เป็นเพราะอนุภาคซิลเวอร์ไอออนจะเข้าไปยับยั้งโปรตีนบนเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เซลล์ตายหรือในอีกกรณีหนึ่งก็คืออนุภาคซิลเวอร์ไอออนจะแพร่ผ่านไปสู่ชั้นในของเซลล์แบคทีเรีย ทำให้ DNA เสียสภาพจากภายในเซลล์ไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ [42] ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเมทิลเมทาคริเลตผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนจึงมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) และแกรมลบ (*E.coli*) ได้อย่างดีเยี่ยม



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) โดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมทิลเมทาคริเลตและโพลีเมทิลเมทาคริเลตผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) โดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมทิลเมทาคริเลต โพลีเมทิลเมทาคริเลตผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิเมตร และโพลีเมทิลเมทาคริเลตผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิเมตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.25 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร โดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมทิลเมทาคริเลตและโพลีเมทิลเมทาคริเลตผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.9 ผลการวิเคราะห์ศึกษาสมบัติเชิงกล

ศึกษาสมบัติเชิงกล Tensile testing และ Compression testing โดยทดสอบการต้านทานแรงดึง และทดสอบการต้านทานแรงกดของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสม โดยแบ่งตามการเติมปริมาณกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังต่อไปนี้

- โพลีเอทิลีน (NRF)
- โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์  $2 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 1 ml)
- โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml)
- โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์  $1 \times 10^{-3}$  phr (NRF + GO 5 ml)
- โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $5 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml + AgNPs 0.25 ml)
- โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $6 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml + AgNPs 0.5 ml)
- โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $1 \times 10^{-3}$  phr (NRF+GO 3 ml + AgNPs 1 ml)

ซึ่งแสดงผลการศึกษาดังตารางที่ 4.2 – 4.5

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีน และโพลีเอทิลีนผสม กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

กราฟีนออกไซด์ (ml)	Stress at Maximum Load (MPa)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)	Load at break (N)
0	0.131	0.257	0.062	12.467
1	0.137	0.293	0.075	13.035
3	0.14	0.31	0.081	13.325
5	0.096	0.246	0.054	9.046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสม กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

กราฟีนออกไซด์ (ml)	อนุภาคซิลเวอร์นาโน (ml)	Stress at Maximum Load (MPa)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)	Load at break (N)
0	0	0.131	0.257	0.062	12.467
3	0.25	0.127	0.284	0.073	12.102
3	0.5	0.121	0.276	0.07	11.446
3	1	0.114	0.261	0.068	10.868

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกดของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

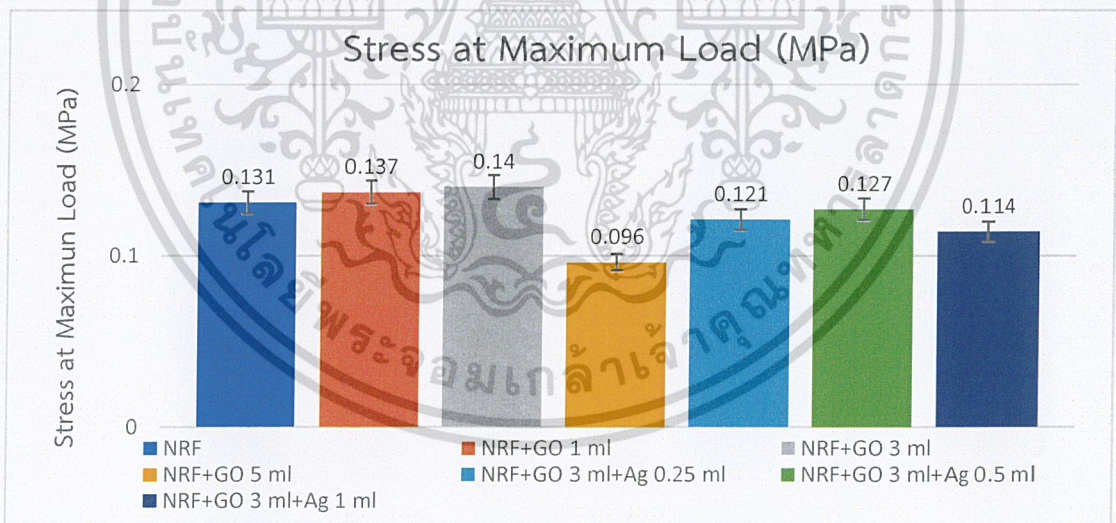
กราฟีนออกไซด์ (ml)	Stress at Maximum Load (MPa)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)
0	0.013	16.074	0.161
1	0.015	18.182	0.179
3	0.016	19.964	0.187
5	0.013	12.144	0.155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกดของโพลีเมอร์ธรรมชาติ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

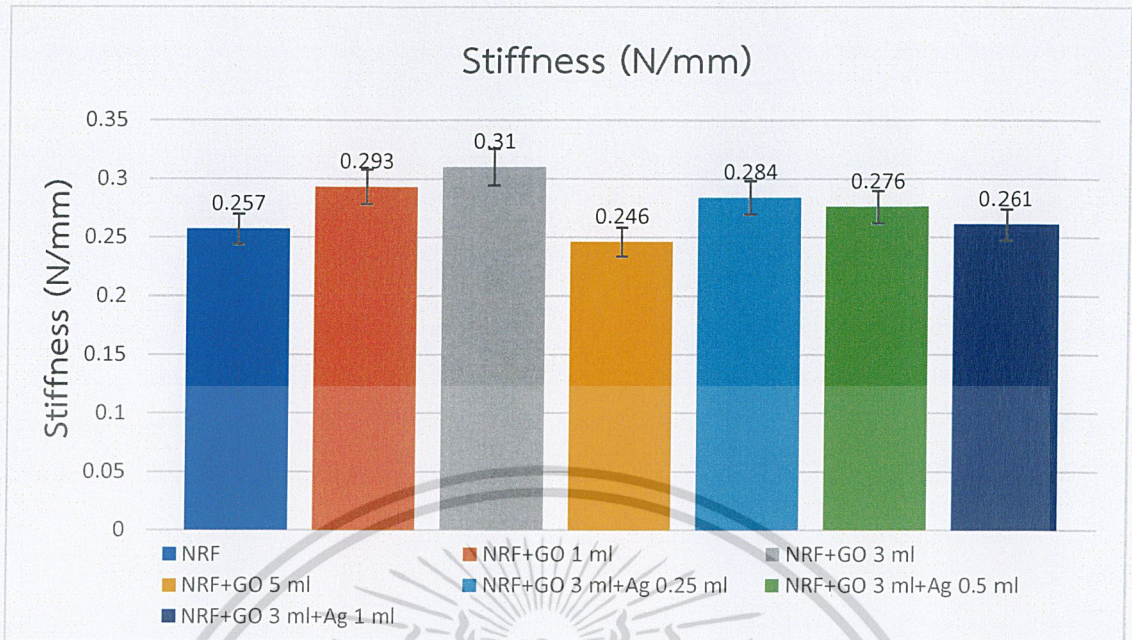
กราฟีนออกไซด์ (ml)	อนุภาคซิลเวอร์นาโน (ml)	Stress at Maximum Load (MPa)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)
0	0	0.013	16.074	0.161
3	0.25	0.013	15.455	0.156
3	0.5	0.012	14.493	0.138
3	1	0.011	13.248	0.124

จากผลการทดสอบการต้านทานแรงดึง และการต้านทานแรงกด ของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ สามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 – 4.49

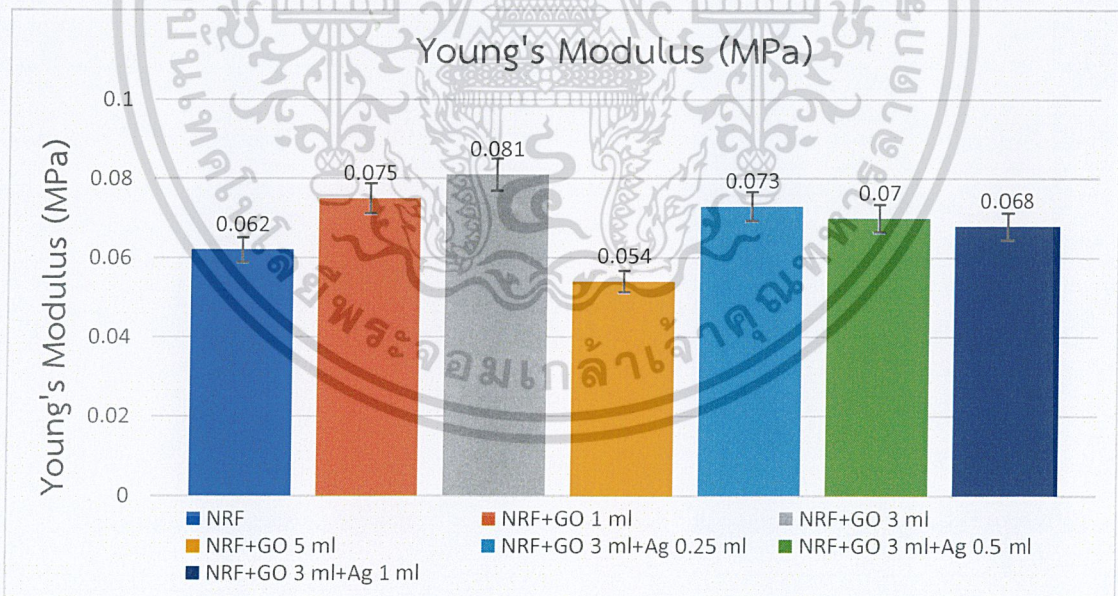


รูปที่ 4.39 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum (Tensile testing) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

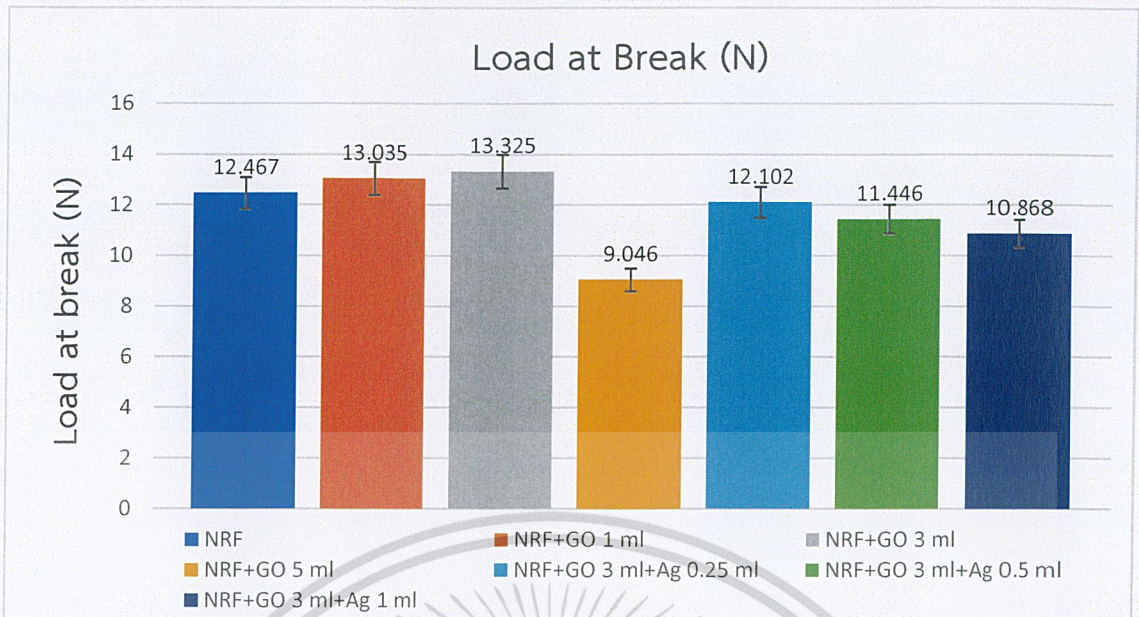


รูปที่ 4.40 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness (Tensile testing) ของโพลีเมยางธรรมชาติ โพลีเมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

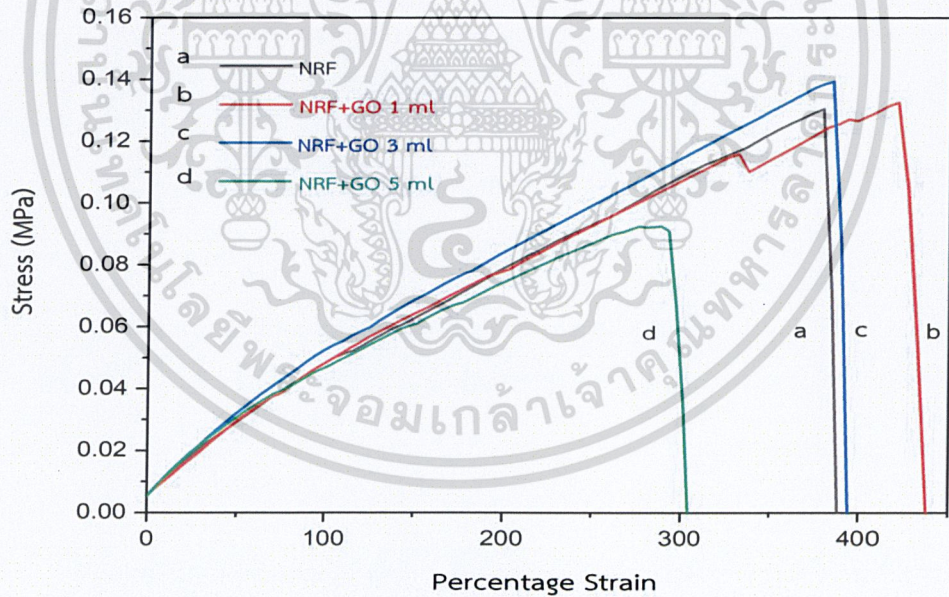


รูปที่ 4.41 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus (Tensile testing) ของโพลีเมยางธรรมชาติ โพลีเมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

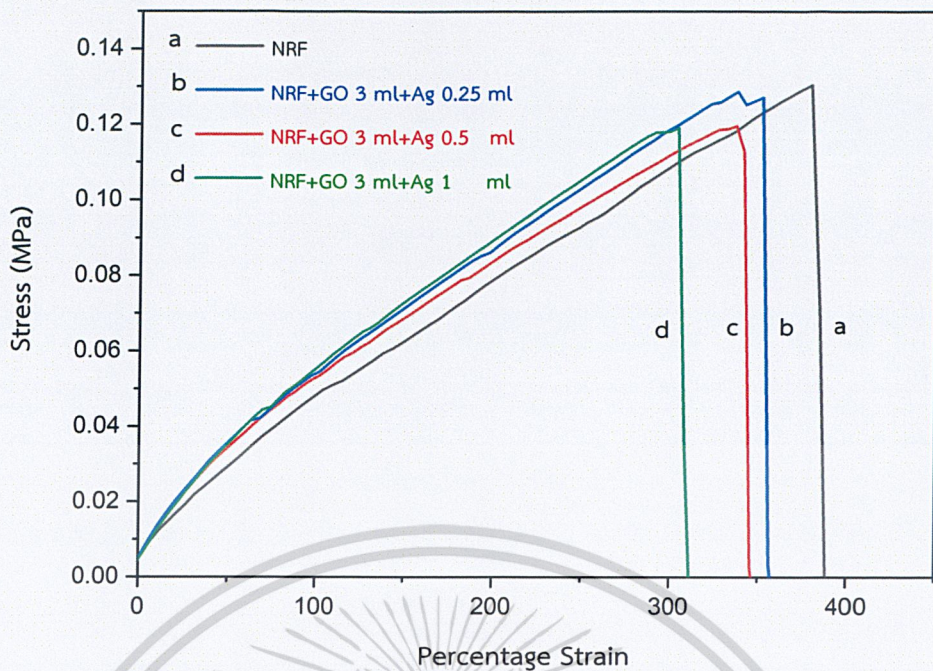


รูปที่ 4.42 แสดงการเปรียบเทียบ Load at break (Tensile testing) ของโพลีเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ โพลีเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่ปริมาณต่างๆ

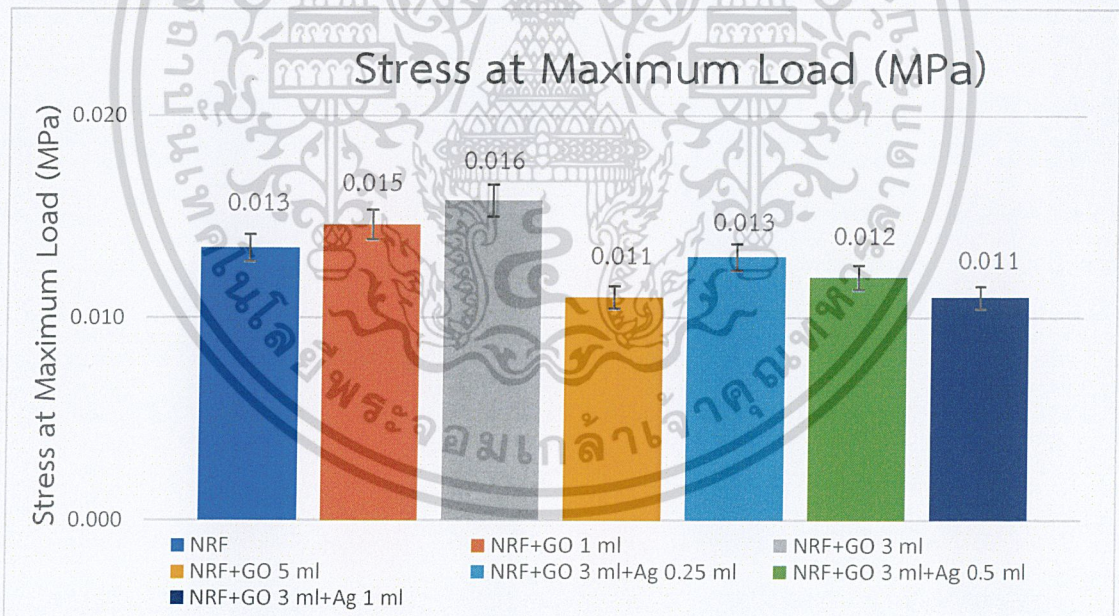


รูปที่ 4.43 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของของโพลีเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ และโพลีเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

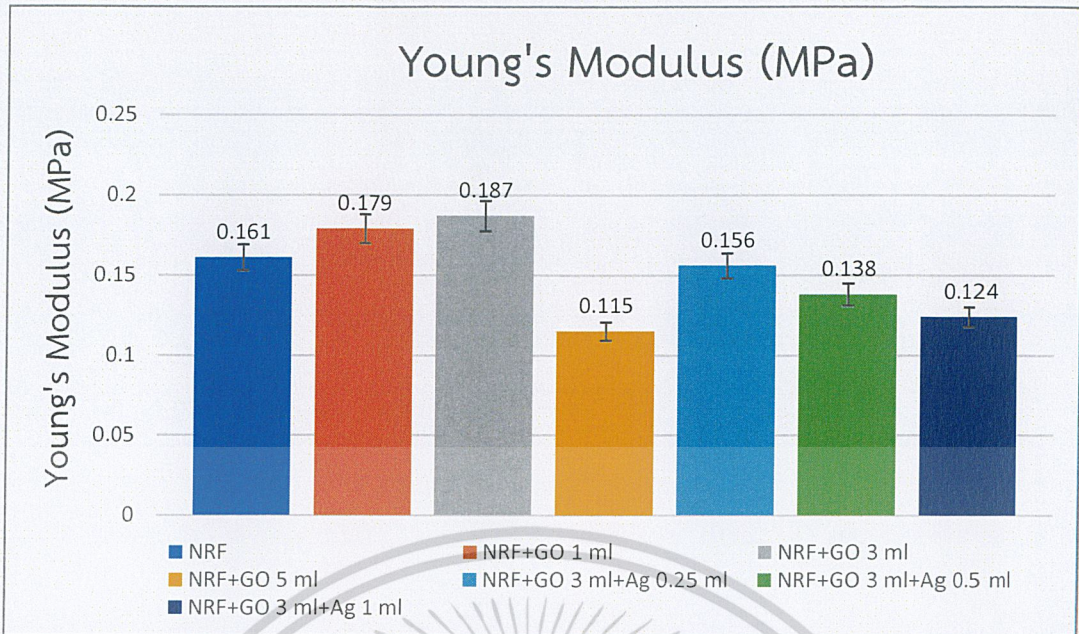


รูปที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

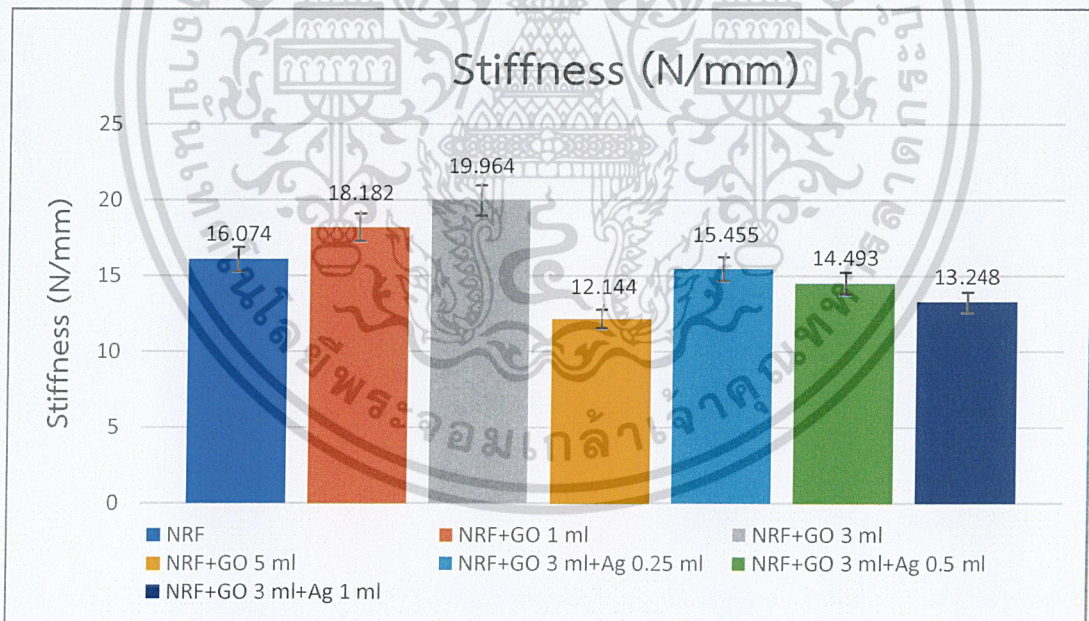


รูปที่ 4.45 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum (Compression testing) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

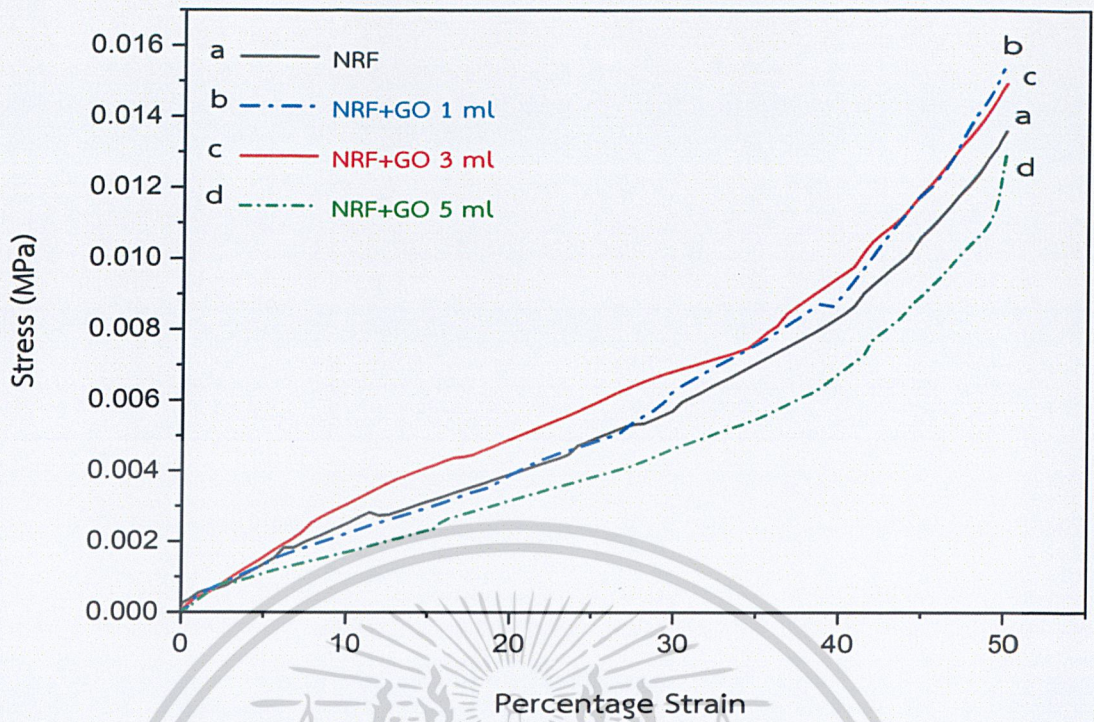


รูปที่ 4.46 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus (Compression testing) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

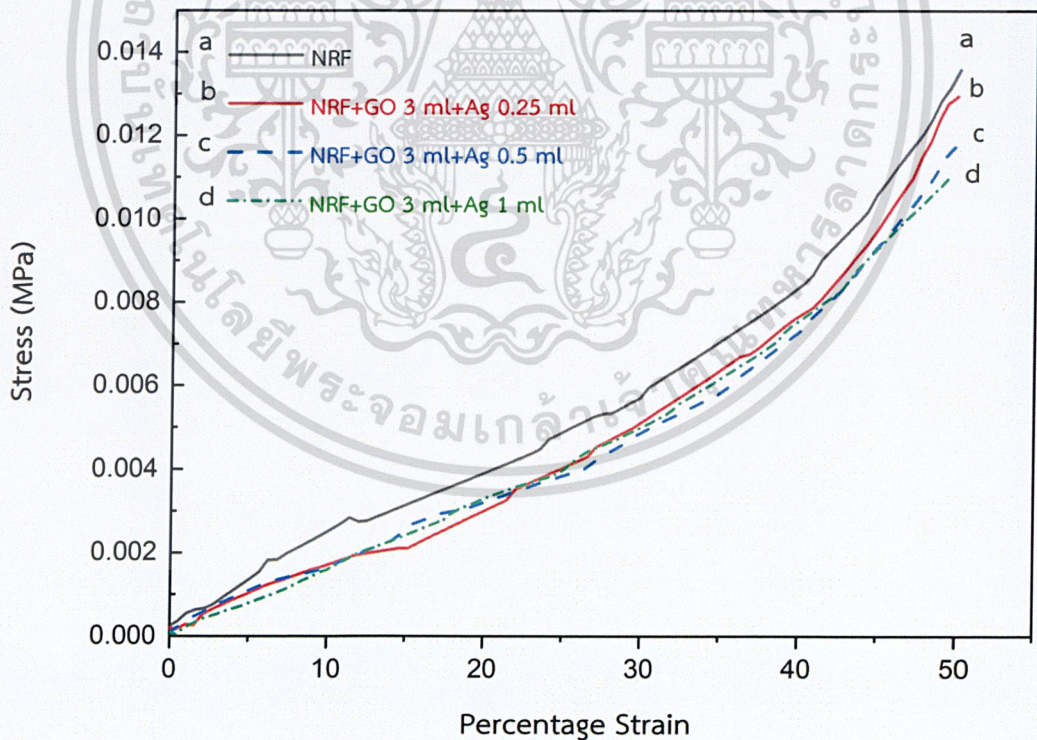


รูปที่ 4.47 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness (Compression testing) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างกราฟ Compression testing ของโฟมยางธรรมชาติ และโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.49 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างกราฟ Compression testing ของโฟมยางธรรมชาติ และโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 และ 4.4 ผลจากการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันลงในโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต พบว่าโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร จะมีค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load) ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) ค่าการคงรูป (Stiffness) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) มีค่ามากที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต และโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ (1 และ 5 มิลลิลิตร) ทั้งนี้เป็นเพราะผลจากการใส่กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดีในน้ำยางธรรมชาติ และ กราฟีนออกไซด์ไม่เกิดการเกาะตัวจับกลุ่มกัน แต่เมื่อทำการเพิ่มกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load) ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) ค่าการคงรูป (Stiffness) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) มีค่าที่ลดลง นั่นเป็นเพราะ กราฟีนออกไซด์ที่เติมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะเริ่มเกิดการจับตัวกันทำให้สมบัติของความเป็นยางธรรมชาติลดลง ดังนั้นจึงส่งผลให้กราฟีนออกไซด์ที่เติมในปริมาณที่มากที่สุดมีสมบัติเชิงกลที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งใน Tensile testing และ Compression testing

จากตารางที่ 4.3 พบว่าโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตที่ผสมกราฟีนกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ (0.25 0.5 และ 1 มิลลิลิตร) จะส่งผลให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) มีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเทียบกับโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต ทั้งนี้เป็นเพราะโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตผสมกราฟีนกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน จะเสียสมบัติความยืดหยุ่นของความเป็นยางธรรมชาติที่ลดลง แต่ทั้งนี้ยังมีค่าการคงรูป (Stiffness) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ที่สูงกว่ายางธรรมชาติ เป็นเพราะกราฟีนออกไซด์ที่ใส่ไปในโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตในปริมาณที่เหมาะสม และมีการกระจายตัวที่ดี จะเข้าไปช่วยให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนไม่เข้าไปทำลายโครงสร้างภายในของยางธรรมชาติทั้งหมดจึงเป็นเหตุผลให้ ค่าการคงรูป (Stiffness) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ

จากตารางที่ 4.5 พบว่าโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตที่ผสมกราฟีนกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ จะส่งผลให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load) ค่าการคงรูป (Stiffness) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ที่ค่าต่ำกว่าโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต เป็นเพราะผลจากการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนทำให้สายโซ่ของยางถูกทำลายความเป็นรูพรุนภายในโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต ไม่สม่ำเสมอ เกิดการฉีกขาดภายใน ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกดจึงเกิดการเสียรูปได้ง่าย จึงทำให้มีค่าที่ต่ำกว่าโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต

จากรูปที่ 4.43 และ 4.48 เมื่อนำโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตและโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ไปทำการทดสอบการต้านทานแรงดึง และทดสอบการต้านทานแรงกดพบว่า โพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตผสม กราฟีนออกไซด์ที่ 3 มิลลิลิตร มีเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่สูง นั่นก็แสดงให้เห็นว่าโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตผสมกราฟีนออกไซด์ที่ 3 มิลลิลิตร มีความสามารถทนต่อแรงดึงได้สูงและยังมีความสามารถในการคงทนต่อการเสียรูปได้มากที่สุด แม้จะอยู่ภายใต้สภาวะที่มีความเครียดสูง ทั้งนี้ยังพบอีกว่า โพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลตผสมกราฟีนออกไซด์ที่ 3 มิลลิลิตร มีค่าความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แจ้งว่าหากมีการใช้งานเมื่อออกจากรายงานนี้ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at Maximum lode) ค่ามอดูลัสยัง (Young's Modulus) และค่าการคงรูป (Stiffness) มีค่ามากที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าผลจากการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปไนโพมายงธรรมชาติในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้โพมายงธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเนื่องจากกราฟีนออกไซด์เป็นสารที่มีความแข็งและยืดหยุ่นในการดึงสูง อีกทั้งโครงสร้างยังเป็น 2 มิติและมีความบาง จึงสามารถทำให้กราฟีนออกไซด์เข้าไปแทรกกระหว่างโครงสร้างของยางธรรมชาติได้ดี [17]

จากรูปที่ 4.44 และ 4.49 เมื่อนำโพมายงธรรมชาติและโพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ ไปทำการทดสอบการต้านทานแรงดึง และทดสอบการต้านทานแรงกดพบว่าโพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะมีเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ต่ำกว่าโพมายงธรรมชาติตามลำดับ นั่นก็แสดงให้เห็นว่าโพมายงธรรมชาติผสม กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน มีความสามารถในการคงทนต่อการเสีรูปร่างที่ต่ำตั้นนั้นเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีความเครียดสูงก็จะทำให้โพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย ทั้งนี้เกิดจากการที่อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการสังเคราะห์มีสภาพความเป็นกรด ดังนั้นเมื่อทำการเติมลงในน้ำยางธรรมชาติที่มีสภาพความเป็นเบส ก็จะส่งผลให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนเข้าไปทำลายโครงสร้างของยางทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ฉะนั้นจึงส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านเชิงกลในเรื่องของการต้านทานแรงกด และการต้านทานแรงดึงของโพมายงธรรมชาติที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีค่าที่ต่ำลง

#### 4.3.10 ผลการวิเคราะห์การวัดมุมสัมผัส

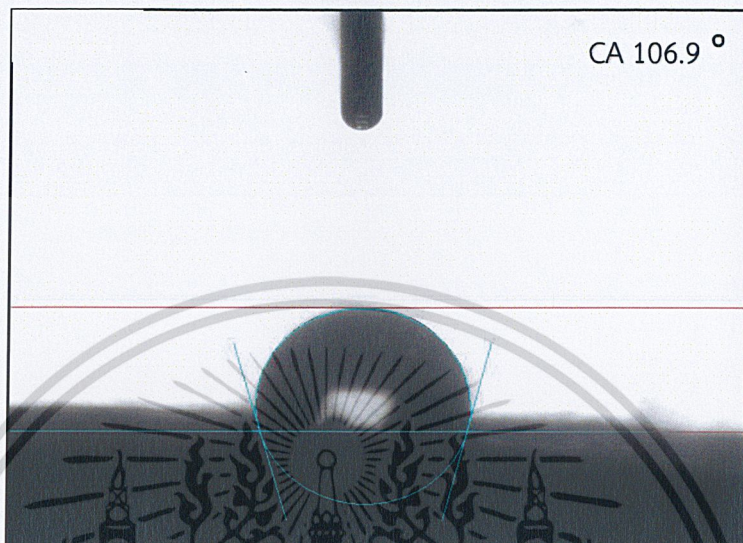
เทคนิค Contact angle ใช้หลักการของ Young equation เพื่อใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับแรงตึงผิวของวัสดุ โดยวัดได้จากมุมของของเหลวที่กระทำกับของแข็งที่เป็นระนาบอ้างอิง โดยพบว่าหากมุมของของเหลวที่วัดได้เมื่อเทียบกับระนาบอ้างอิงมีมุมที่กว้างแสดงว่าของเหลวที่ทำการวัดนั้นมีแรงตึงผิวสูง และในทางกลับกันหากมุมที่วัดได้เป็นมุมที่แคบแสดงว่าจะมีแรงตึงผิวที่น้อย ซึ่งผลการวิเคราะห์โพมายงธรรมชาติ โพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ และโพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน แบ่งตามการเติมปริมาณกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังต่อไปนี้

- โพมายงธรรมชาติ (NRF)
- โพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $2 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 1 ml)
- โพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml)
- โพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $1 \times 10^{-3}$  phr (NRF + GO 5 ml)
- โพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $5 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml + AgNPs 0.25 ml)
- โพมายงธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $6 \times 10^{-4}$  phr (NRF + GO 3 ml + AgNPs 0.5 ml)

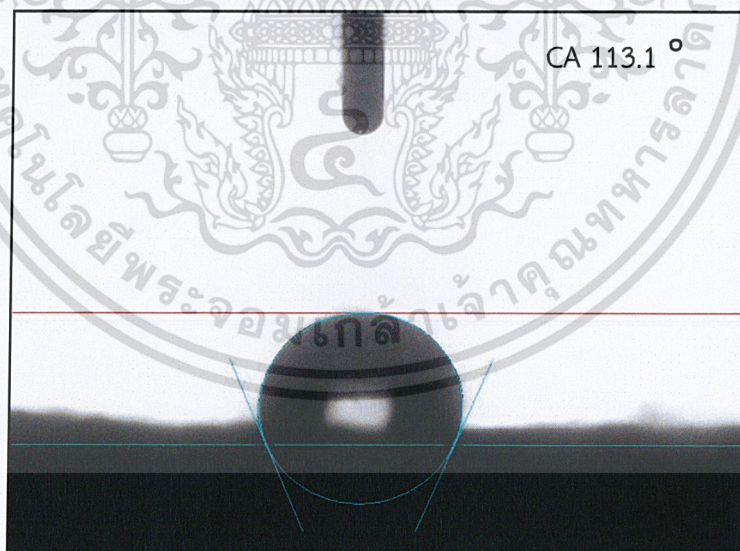
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $1 \times 10^{-3}$  phr (NRF+GO 3 ml + AgNPs 1 ml)

ซึ่งแสดงผลการศึกษาในรูปที่ 4.50 – 4.56

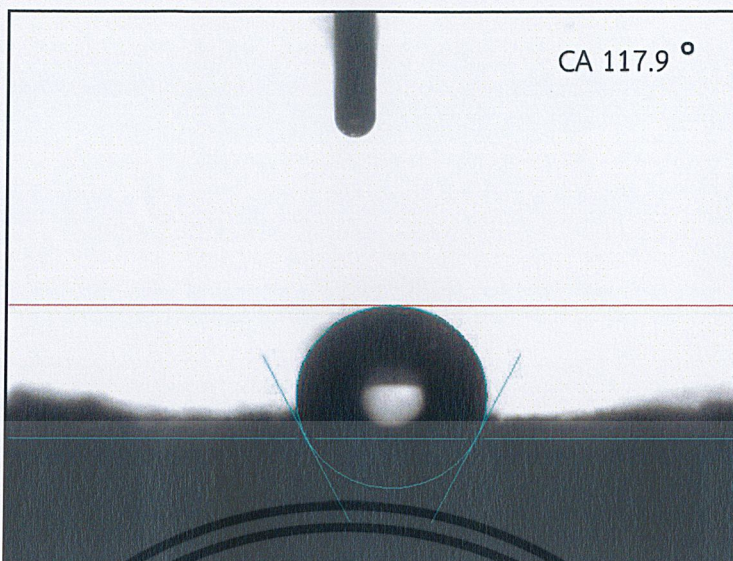


รูปที่ 4.50 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของโฟมยางธรรมชาติ (NRF)



รูปที่ 4.51 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของโฟมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร (NRF+GO-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

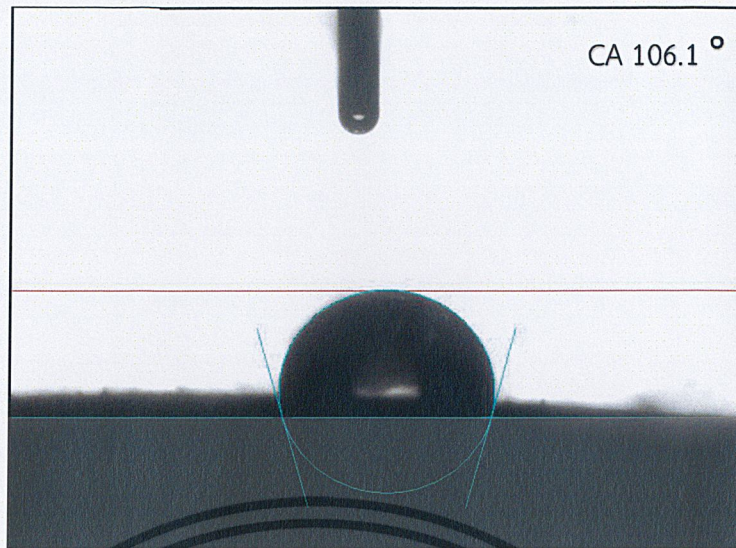


รูปที่ 4.52 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร (NRF+GO-3)



รูปที่ 4.53 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 5 มิลลิลิตร (NRF+GO-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

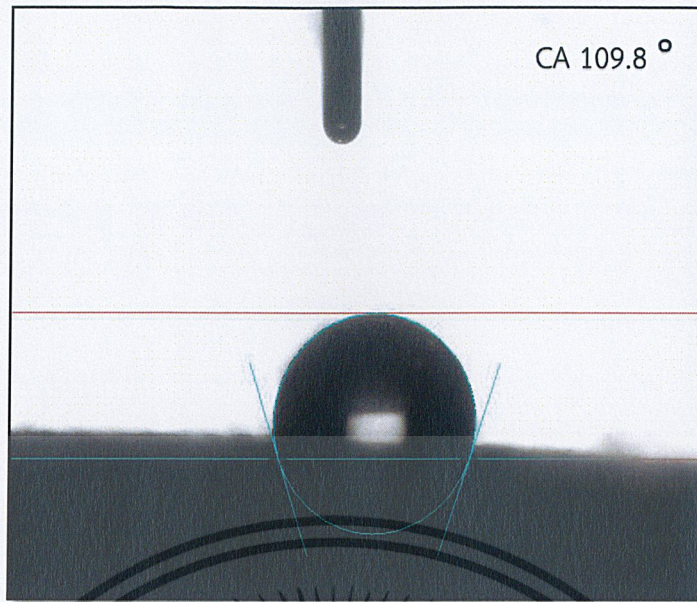


รูปที่ 4.54 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 มิลลิลิตร (NRF+GO-3+AgNPs-0.25)



รูปที่ 4.55 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสโพลีเมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 มิลลิลิตร (NRF+GO-3+AgNPs-0.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 แสดงภาพการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต 3 มิลลิลิตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร (NRF+GO-3+AgNPs-1)

จากรูปที่ 4.50 – 4.53 เมื่อทำการเปรียบเทียบภาพถ่ายจากการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร พบว่าโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำอยู่ที่ 106.9 องศา แต่เมื่อทำการเติม กราฟีนออกไซด์ใส่ในโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำเพิ่มขึ้น โดยโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำอยู่ที่ 113.1 องศา โพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต 3 มิลลิลิตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำอยู่ที่ 117.9 องศา และโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต 5 มิลลิลิตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำอยู่ที่ 137.7 องศา นั้นแสดงให้เห็นว่า แม้กราฟีนออกไซด์มีสมบัติที่ชอบน้ำ แต่เมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟตจะส่งผลให้รูพรุนมีขนาดที่เล็กลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต 5 มิลลิลิตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัสที่สูงที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปจะทำให้พื้นผิวของโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟตมีพื้นผิวที่เรียบขึ้นและมีความเป็นรูพรุนที่ต่ำลง ดังนั้นจึงทำให้น้ำสามารถรักษาสภาพทรงกลมในลักษณะของหยดน้ำไว้ได้ จึงทำให้มีค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำสูงที่สุด ซึ่งจะส่งผลดีต่อโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟตนั้นก็คือจะทำให้โพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟตมีความชื้นที่ลดลง และลดสาเหตุของการเกิดเชื้อรา และแบคทีเรียที่จะเกิดขึ้นในโพลียเอทิลีนทรีฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.54 – 4.56 ผลจากการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในโพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสม กราฟีนออกไซด์ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสมกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบโพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสมกราฟีนออกไซด์ที่ 3 มิลลิเมตร และโพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสมกราฟีนออกไซด์ 3 มิลลิเมตร กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ 0.25 0.5 และ 1 มิลลิเมตร พบว่าจะมีค่าการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ลดลง โดยโพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสม กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 มิลลิเมตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำอยู่ที่ 106.1 องศา โพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 มิลลิเมตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัส หยดน้ำอยู่ที่ 111.7 องศา โพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิเมตร จะมีค่าการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำอยู่ที่ 109.8 องศา ซึ่งสาเหตุของการลดลงของค่าการวัดมุมสัมผัสหยด น้ำนี้มาจากการที่ลักษณะพื้นผิวของโพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน มีพื้นผิวที่ไม่เรียบ เนื่องจากเกิดการเสถียรภาพความเป็นรูพรุนในโครงสร้าง จากการที่อนุภาคซิลเวอร์ นาโนจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของโพลีเอทิลีนทรีคอมโพสิตผสมกราฟีนออกไซด์ที่ได้กล่าวมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

#### 5.1.1 สรุปผลคุณลักษณะของสารตัวเติมกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD ของกราฟีนออกไซด์ พบว่ากราฟีนออกไซด์จะพบพีคที่มีความเข้มสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $10.20^\circ$  มีระยะห่างระหว่งระนาบ คือ 0.86 นาโนเมตร ซึ่งเป็นมุมการเลี้ยวเบนของกราฟีนออกไซด์

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค UV-Visible ของกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน พบว่า กราฟีนออกไซด์จะปรากฏพีคเอกลักษณ์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร และความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะปรากฏพีคเอกลักษณ์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการยืนยันการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค FT-IR พบว่ากราฟีนออกไซด์ จะมีแถบการสั่นโดยเป็นการสั่นของพันธะ (-O-H) พันธะ (-C=C-) ของวงอะโรมาติก พันธะ (-C=O) ของสารประกอบคาร์บอนิกและคาร์บอกซิลิก และแอลคอกซี (-C-O-C) ซึ่งเป็นการยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่พบในกราฟีนออกไซด์

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค Raman พบว่ากราฟีนออกไซด์มีอัตราส่วน  $I_D/I_G$  มีค่าเท่ากับ 0.95 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกราฟไฟต์แล้วจะมีอัตราส่วน  $I_D/I_G$  ที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เกิดจากข้อบกพร่อง (defect) และความไม่เป็นระเบียบ (disorder) ในผลึกที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นขรุขระ ซ้อนทับกันหลายชั้น ซึ่งผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค TEM จะพบว่ากราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่น 2 มิติที่มีความบางเนื่องจากแสงสามารถส่องผ่านได้

### 5.1.2 สรุปผลคุณลักษณะของโพลีเมอร์นาโน โพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD จะพบพีกเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ ในโพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน นอกจากนี้ยังพบพีกของ ZnO ในโพลีเมอร์นาโน โพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนอีกด้วย

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค FTIR พบว่าโพลีเมอร์นาโน โพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน จะพบแถบการสั่นของโมเลกุลของโพลีเมอร์นาโนเป็นหลัก ส่วนในโพลีเมอร์นาโนผสมจะไม่พบแถบการสั่นของกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค Raman พบว่าเมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ในโพลีเมอร์นาโน พบว่าตำแหน่งของพีกของโพลีเมอร์นาโนจะลดลง และจะมีแถบ D band ที่กว้างขึ้นทั้งในโพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์ และโพลีเมอร์นาโนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค UV-visible เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน จะทำให้โพลีเมอร์นาโนผสมมีการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น โดยโพลีเมอร์นาโนผสมที่มีการเติมปริมาณกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโนสูงสุด จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงที่สุด

ผลจากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และ EDS พบว่าเมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณสูงสุดในโพลีเมอร์นาโน จะส่งผลให้เนื้อโพลีเมอร์นาโนเกิดการเสียสภาพความเป็นรูพรุนไม่สม่ำเสมอ เนื้อโพลีเมอร์นาโนไม่เชื่อมต่อกัน เนื่องจากเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีของกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 สรุปผลสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน การวัดมุมสัมผัส และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์ โพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยทดสอบการต้านทานแรงดึง และทดสอบการต้านทานแรงกด พบว่าเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงในโพลีเอทิลีนจะทำให้มีค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด ค่าการคงรูป ค่ามอดูลัสของยัง และค่าแรงดึงที่จุดขาด มีค่าที่สูงขึ้น โดยการเติมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 3 มิลลิกรัม จะมีค่าจากการทดสอบสมบัติเชิงกลสูงสุด แต่เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่เกินความเหมาะสมนั้นคือที่ 5 มิลลิกรัม จะทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด ค่าการคงรูป ค่ามอดูลัสของยัง และค่าแรงดึงที่จุดขาด มีค่าที่ต่ำลง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีน ส่วนโพลีเอทิลีนผสม กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะมีค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด ค่าการคงรูป ค่ามอดูลัสของยัง และค่าแรงดึงที่จุดขาด มีค่าที่ต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีน

จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าเมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในโพลีเอทิลีน ในปริมาณที่กำหนด จะไม่ทำให้เกิดการเสถียรภาพของโพลีเอทิลีนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดสอบการวัดมุมสัมผัส ผลจากการเติมกราฟีนออกไซด์ลงในโพลีเอทิลีน พบว่ามีค่าการวัดมุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น โดยโพลีเอทิลีนที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 5 มิลลิกรัมจะมีค่าการวัดมุมสัมผัสที่สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าโพลีเอทิลีนผสมมีความสภาพไม่ชอบน้ำเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีน และโพลีเอทิลีนผสม แต่เมื่อทำการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์พบว่ามีค่าการวัดมุมสัมผัสที่ลดลงมีค่าที่ใกล้เคียงกับโพลีเอทิลีน

จากการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย พบว่าโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งในแกรมบวก (*S.aureus*) และแกรมลบ (*E.coli*) ดีที่สุด โดยในโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ 1 มิลลิกรัมจะมีค่าการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่สูงที่สุด ส่วนโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ก็มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยวิธีไมโครเวฟ กำลังไฟฟ้า และระยะเวลาในการสังเคราะห์ ส่งผลต่อขนาดของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้ ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

2. สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ ควรเก็บไว้ในตู้เย็น และควรใช้ภายใน 1 อาทิตย์ เพื่อประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในพืชมยางธรรมชาติ

3. ในขั้นตอนการเตรียมพืชมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ควรนำสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโนมาทำการปั่นผสม ก่อนนำไปเทใส่ในน้ำยางธรรมชาติ เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนทำลายโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยตรง

4. ในขั้นตอนการเตรียมพืชมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ควรเติมแอมโมเนียมลงในน้ำยางธรรมชาติ 2-3 หยด ในขั้นตอนของการปั่นน้ำยางธรรมชาติเพื่อเป็นการเพิ่มความเป็นเบสให้กับน้ำยางธรรมชาติ

5. ในขั้นตอนของการเทพืชมยางธรรมชาติลงในแม่พิมพ์ควรเทบริเวณตรงกลางแม่พิมพ์เพื่อเป็นการลดการยึดเกาะพืชมยางธรรมชาติกับแม่พิมพ์ก่อนการเซ็ทตัว

6. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงจากกราฟีนออกไซด์ เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมพืชมยางธรรมชาติ มีสารเคมีและความร้อนจากการอบ มีโอกาสที่จะทำให้เกิดรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2561. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร. [Online]. Available : [http://www.oae.go.th/ewt\\_news.php?nid=13577](http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=13577).
- [2] บทความวิทยาศาสตร์. 2004. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber). [Online]. Available : <http://www.electron.rmutphysics.com/science-news>.
- [3] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง. 2562. ผลิตภัณฑ์โฟมยาง. [Online]. Available : <http://mahidolrubber.org/files/technicalsheet/foam.pdf>.
- [4] Naturefoam. 2562. ผลิตภัณฑ์โฟมยางธรรมชาติ. [Online]. Available : <http://www.naturefoam.com>.
- [5] S. Park and R.S. Ruoff. 2009. “chemical methods for the production of graphenes.” Nature Nanotechnology, 4, 217.
- [6] D. Shin, S.Bae, C. Yan, J. Kang, J. Ryu, J.-H.Ahn, and B.H. Hong. 2012. “Synthesis and applications of graphene electrodes.” Carbon Letters, 13(1), 1-16.
- [7] D.A. Dikin, S.Stankovich, E.J. Zimney, R.D. Piner, G. H. B. Dommett, G.Evmenenko, S.T. Nguyen and R.S. Ruoff. 2007. “Preparation and characterization of graphene oxide paper.” Nature, 488, 457.
- [8] ฉัตรแก้ว จันทราภรณ์. 2553. “ซิลเวอร์นาโน” การสังเคราะห์ การผลิต และประสิทธิภาพในการต้านแบคทีเรียของพลาสติกผสม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [9] Xiuju Liu, Kang Gan, Hong Liu, Xiaoqing Song, Tianjie Chen. 2017. “Antibacterial properties of nano-silver coated PEEK prepared through magnetron sputtering.” Dental Materials 33.
- [10] นันทิญา. 2554. ประวัติยางธรรมชาติ. [Online]. Available : [http://nantiya05601.blogspot.com/2011/02/blog-post\\_7923.html](http://nantiya05601.blogspot.com/2011/02/blog-post_7923.html).
- [11] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2559. การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรม. [online]. Available : <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR%2039.pdf>.
- [12] การยางแห่งประเทศไทย (Rubber Authority of Thailand). 2559. ชนิดของยางธรรมชาติ. [Online]. Available : <http://www.raot.co.th>.
- [13] ศิริชัย พัฒนวานิชชัย. 2557. ผลิตภัณฑ์โฟมยาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Daniel Boudreau. 2019. DUNLOP LATEX VS. TALALAY LATEX.  
[Online]. Available : <https://www.naturalmattressfinder.com>.
- [15] กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2556. สารเคมีสำหรับยาง (Additives for Rubber).  
[Online]. Available : <http://www.dss.go.th/images/st-article/pep-8-2556-afr.pdf>.
- [16] ผศ.ดร.ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธุ์. 2019. กราฟีน. [Online]. Available : .  
<https://erp.mju.ac.th>.
- [17] วิศณุสรุรงค์ ขาดิอารยะวดี. 2019. คุณสมบัติของกราฟีน. [Online]. Available :  
<https://sites.google.com/site/cs5404061636313/cooling-off-with-graphene/khunsmbati-khx-ngk-ra-fin>.
- [18] ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านฟิสิกส์. 2556. การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีการทางเคมี ( Chemical Exfoliation). [Online]. Available : [http://thep-center.org/src2/views/network-academic-news.php?news\\_id=7](http://thep-center.org/src2/views/network-academic-news.php?news_id=7)
- [19] Ali Ammar, Abdullah M.Al-Enizi, Mariam ALAli ALMaadeed and Alamgir Karim. 2016. “Influence of graphene oxide on mechanical, morphological, barrier, and electrical properties of polymer membranes.” Arabian Journal of Chemistry,274-286.
- [20] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2562. การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน. [Online]. Available : [KMITL.res](http://KMITL.res).
- [21] Warot Prasanseang, Chaval Sriwong, Kittisak Choojun. 2017 “Effect of Synthesized Ag Nanoparticles by Using the Different Amounts of Polyvinylpyrrolidone for Ag Natural Rubber Hybrid Sheets and their Antibacterial Properties.” Engineering Materials , 751, 270-276.
- [22] VALITECH. 2016. เทคโนโลยีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในแผ่นกรองอากาศด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์. [Online]. Available : <http://www.vali-tech.net/home/article-read.php?ArticleId=9>.
- [23] Chemicalbook. 2017. Polyvinylpyrrolidone. [Online]. Available :  
<https://www.chemicalbook.com>.
- [24] อยู่ดี กินดี. 2019. แบคทีเรีย. [Online]. Available : <https://www.honestdocs.co/bacteria-disease>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2019. ผงเซลล์. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. [Online]. Available:<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4077/cell-wall>
- [26] Yong zheng Pan, Tong fei Wu, Hong qian Bao, Lin Li. 2011. “Green fabrication of chitosan films reinforced with parallel aligned graphene oxide” *Carbohydrate Polymers* 83, 1908-1915.
- [27] D.C. Stanier, A.J. Patil, C. Sriwong, S.S.Rahatekar, J.Ciambellaa. 2014. “The reinforcement effect of exfoliated graphene oxide nanoplatelets on the mechanical and viscoelastic properties of natural rubber” *Composites Science and Technology* 95, 59-66.
- [28] Yiming Liu, Jing Wen, Yang Gao, Tian yang Li, Hui fang Wang, Hong Yan, Baolong Niu, Ruijie Guo. 2018. “Antibacterial graphene oxide coatings on polymer substrate” *Applied Surface Science* 436, 624-630.
- [29] Indrajith U. Rathnayake, Hanafi Ismail, Channa R. De Silva, Nalin Dammika Darsanasiri, Indrani Bose. 2015. “Antibacterial effect of Ag-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles incorporated natural rubber latex foam under visible light conditions” *Iran Polym J* 24, 1057-1068.
- [30] W.G.I.U.Rathnayakea, H.IsmailA.Baharinb, A.G.N.D.Darsanasiric, SanathRajapaksec. 2012. “Synthesis and characterization of nano silver based natural rubber latex foam for imparting antibacterial and anti-fungal properties.” *Polymer Testing* 31, 586-592.
- [31] Chao Li, Xiansong Wang, Feng Chen, Chunlei Zhang, Xiao Zhi, Kan Wang, Daxiang Cui. 2013. “The antifungal activity of graphene oxide-silver nanocomposites.” *Biomaterials* 34, 3882-3890.
- [32] Fatima Tuz Johra, Jee-Wook Lee, Woo-Gwang Jung. 2014. “Facile and safe graphene preparation on solution based platform.” *Journal of industrial and Engineering Chemistry* 20, 2883-2887.
- [33] Ulises Antonio Mendez Romero, Miguel Angel Velasco Soto, Liliana Licea Jimenez, Jaime Alvarez Quintana and Sergio Alfonso Perez Gercia. “Graphene Derivatives: Controlled Properties, Nanocomposites, and Energy Harvesting Applications.” Open access peper-reviewed chapter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] Sudesh, N Kumar, S Das, C Bernhard and G D Varma. 2013. "Effect of graphene oxide doping on superconducting properties of bulk MgB<sub>2</sub>." Supercond. Sci. Technol. 26.
- [35] Qaiser Ali Khan, Ahmed Shaur, Tayyab Ali Khan, Yasir F. Joya and M.S. Awan. 2017. "Characterization of reduced graphene oxide produced through a modified Hoffman method." Cogent Chemistry.
- [36] Amr S ISmail และ Eid A Ismail. "Preparation and Characterization Challenges in Hydroxylation of Neoprene Rubber." Crimson Publishers Wings to the Research.
- [37] Patricia B. Aiello, Felipe A. Borges, Karoline M. Romeira, Carlos Romiro Miranda, Larisa B. de Arruda, Paulo Noronha L. Filho, Bruno de C., Rondinelli D. Herculano. 2014. "Evaluation of sodium Diclofenac Release Using Natural Rubber Latexes Carrier." Materials Research 17 (Suppl. 1) : 146-152.
- [38] Chunmei Zhang, Tianliang Zhai, Yi Dan, Liu-sheng Turng. "Reinforced natural rubber nanocomposites using graphene oxide as a reinforcing agent and their in situ reduction into highly conductive materials." Polymer Composites Volume38, Issue S1.
- [39] Hector Aquilar-Bolados, Ahirton Contreras-Cid, Andronico Neira-Carrillo, Miguel Lopez-Manchado and Mehrdad Yazdani-Pedram. "Removal of Surfactant from Nanocomposites Films Based on Thermally Reduced Graphene Oxide Natural Rubber." Journal of Composites Science.
- [40] Darinya Moonchai, Keartiphum Namwiset and Kanchit Duma. 2014. "Effect of Blowing on Properties of Cellular Natural Rubber Filled with Defatted Rice Brtan." ในรายงานการประชุมวิชาการ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [41] Chenyang Zhang and Jincheng Wang. "Natural Rubber/Dendrimer Modified Montmorillonite Nanocomposites Mechanical and Flame-Retardant Properties." Materials 2018.
- [42] Siamchemi. 2019. ซิลเวอร์นาโน และประโยชน์ซิลเวอร์นาโน. [Online]. Available : <https://www.siamchemi.com>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

การหาความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์ (GO)

ปิเปตสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร นำไปอบแห้ง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก

จำนวนครั้ง	น้ำหนักของ GO (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
1	7.858
2	7.742
เฉลี่ย	7.800

สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์มีความเข้มข้น 7.8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หรือ 0.0078 กรัมต่อมิลลิลิตร

การหาน้ำหนักของยางแห้งธรรมชาติ

นำน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60 % โดยน้ำหนัก ชั่ง 60 กรัม จากนั้นนำไปอบ นำออกมาซึ่งจะได้น้ำหนักยางแห้งเท่ากับ 36 กรัม

การคำนวณเป็น phr (per hundred rubber)

น้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60% โดยน้ำหนัก มีเนื้อยางแห้ง 36 g

- กราฟีนออกไซด์ 1 mL จะมีกราฟีนออกไซด์ 0.0078 g คิดเป็น  $\frac{0.0078 \text{ g}}{36 \text{ g}} = 0.0002 \text{ phr}$

- กราฟีนออกไซด์ 3 mL จะมีกราฟีนออกไซด์  $3 \times 0.0078 = 0.0234 \text{ g}$  คิดเป็น  $\frac{0.0234 \text{ g}}{36 \text{ g}} = 0.0006 \text{ phr}$

- กราฟีนออกไซด์ 5 mL จะมีกราฟีนออกไซด์  $5 \times 0.0078 = 0.039 \text{ g}$  คิดเป็น  $\frac{0.039 \text{ g}}{36 \text{ g}} = 0.001 \text{ phr}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การหาความเข้มข้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs)

ปิเปตสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร นำไปอบแห้ง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก

จำนวนครั้ง	น้ำหนักของ AgNPs (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
1	73.9
2	74.3
เฉลี่ย	74.1

สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนมีความเข้มข้น 74.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หรือ 0.074 กรัมต่อมิลลิลิตร

การคำนวณเป็น phr (per hundred rubber)

น้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60% คือ น้ำยาง 60 g มีเนื้อยางแห้ง 36 g

- อนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.25 mL จะมีอนุภาคซิลเวอร์  $(0.25)(0.074) = 0.018$  g

คิดเป็น  $\frac{0.018g}{36g} = 0.0005$  phr

- อนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.5 mL จะมีอนุภาคซิลเวอร์  $(0.5)(0.074) = 0.037$  g

คิดเป็น  $\frac{0.037g}{36g} = 0.001$  phr

- อนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 mL จะมีอนุภาคซิลเวอร์ 0.074 g คิดเป็น  $\frac{0.074g}{36g} = 0.002$  phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 รูปโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

			
โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ผสมกราฟีนออกไซด์ $2 \times 10^{-4}$ phr	โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ผสมกราฟีนออกไซด์ $6 \times 10^{-4}$ phr	โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ผสมกราฟีนออกไซด์ $1 \times 10^{-3}$ phr

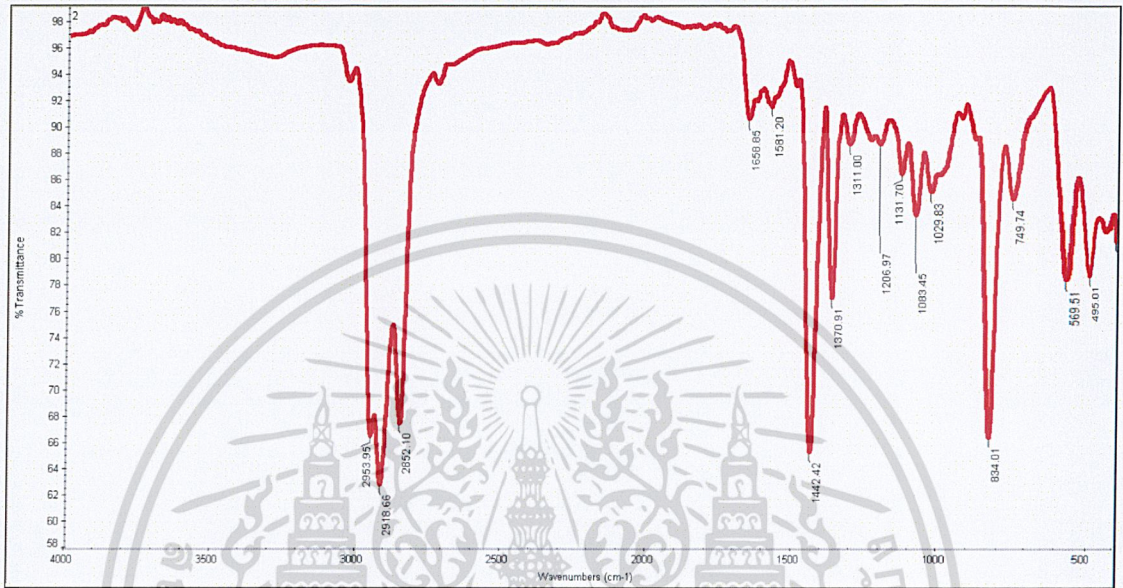
ตารางที่ ข.2 โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ  $6 \times 10^{-4}$  phr ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่างๆ

		
โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ $6 \times 10^{-4}$ phr ผสมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน $5 \times 10^{-4}$ phr	โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ $6 \times 10^{-4}$ phr ผสมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน $1 \times 10^{-3}$ phr	โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกราฟีนออกไซด์ $6 \times 10^{-4}$ phr ผสมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน $2 \times 10^{-3}$ phr

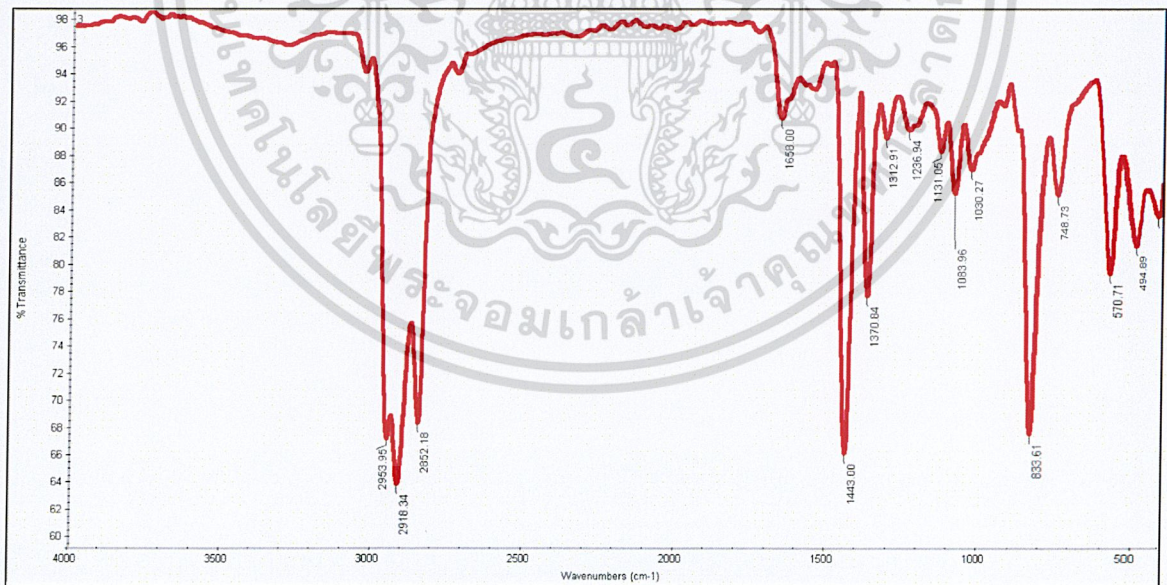
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR)

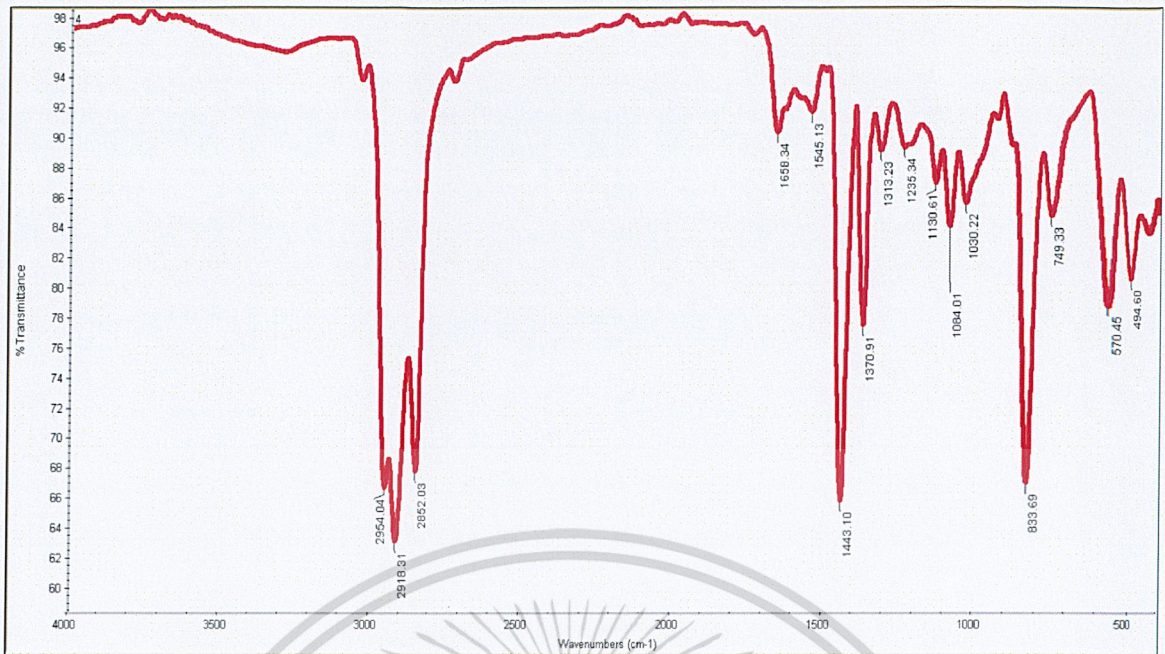


รูปที่ ค.1 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีน

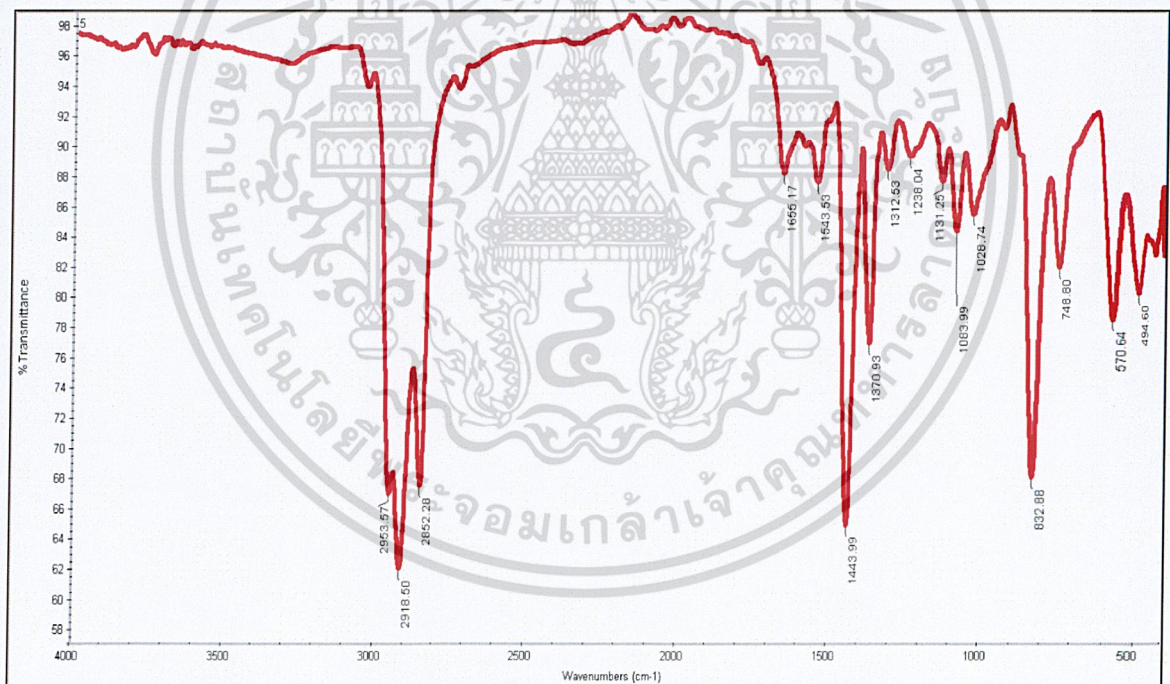


รูปที่ ค.2 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนผสมกราฟีนออกไซด์  $2 \times 10^{-4}$  phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

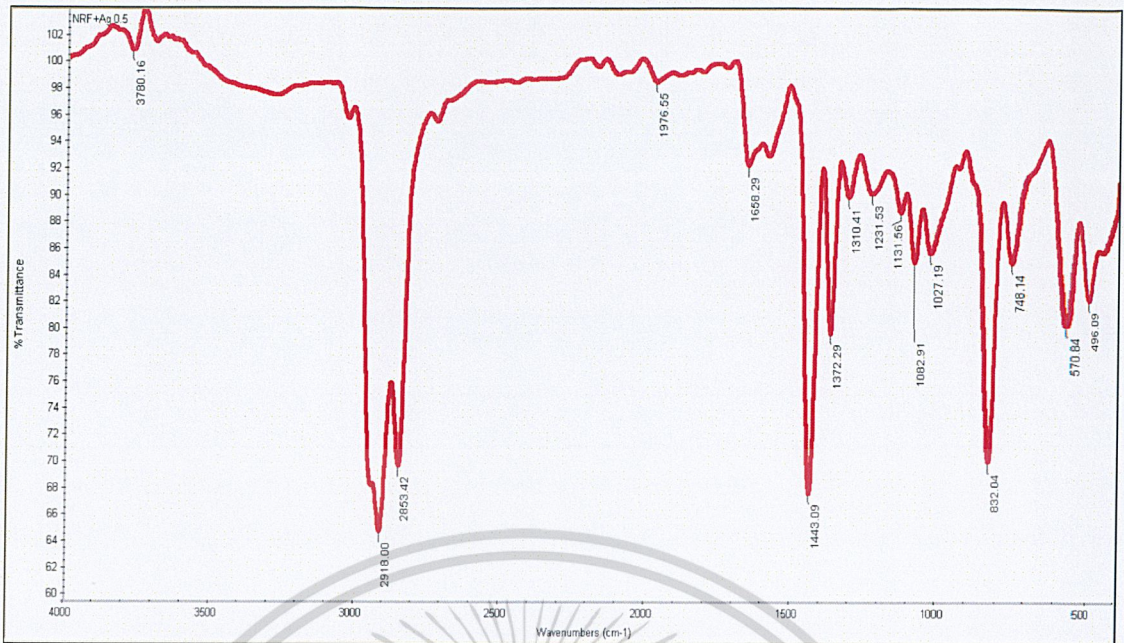


รูปที่ ค.3 กราฟ FT-IR ของโพลีเมยางธรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr

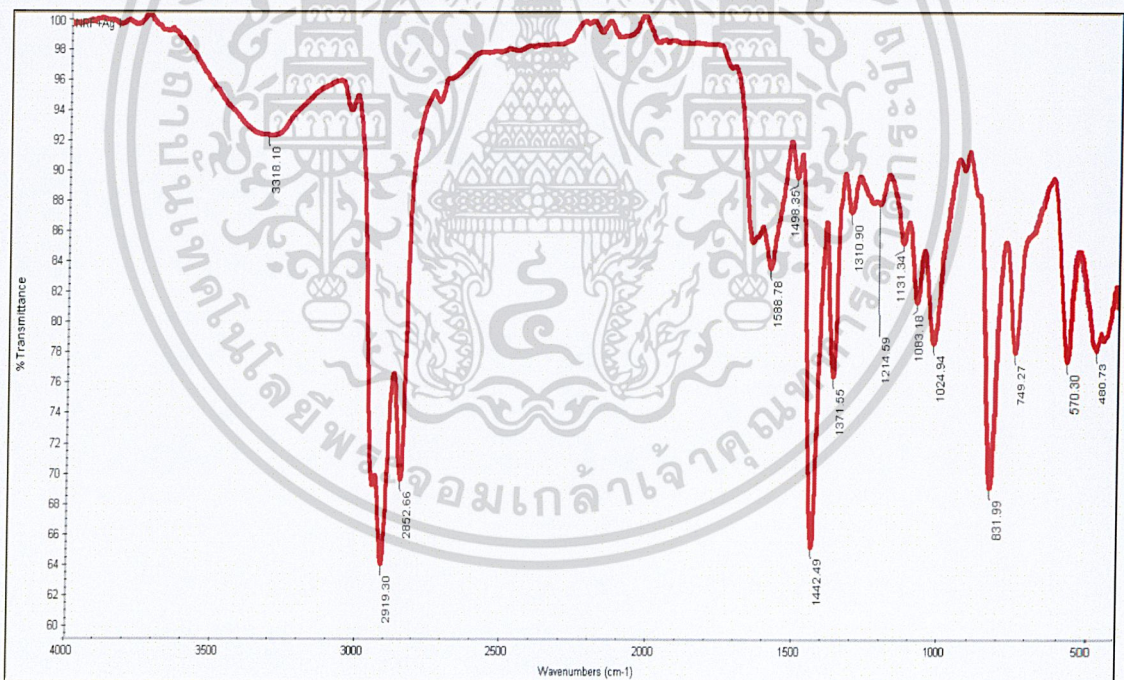


รูปที่ ค.4 กราฟ FT-IR ของโพลีเมยางธรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $1 \times 10^{-3}$  phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.5 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr ผสมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $5 \times 10^{-4}$  phr



รูปที่ ค.6 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr ผสมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $1 \times 10^{-3}$  phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



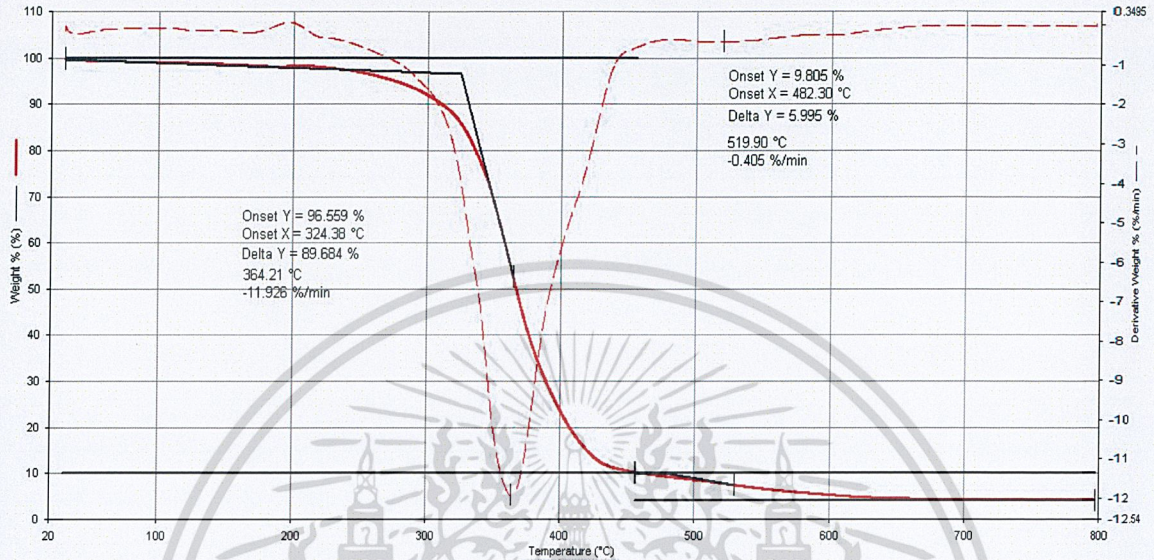
รูปที่ ค.7 กราฟ FT-IR ของโพลีเมอร์ชนิดผสมกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr ผสมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน  $2 \times 10^{-3}$  phr



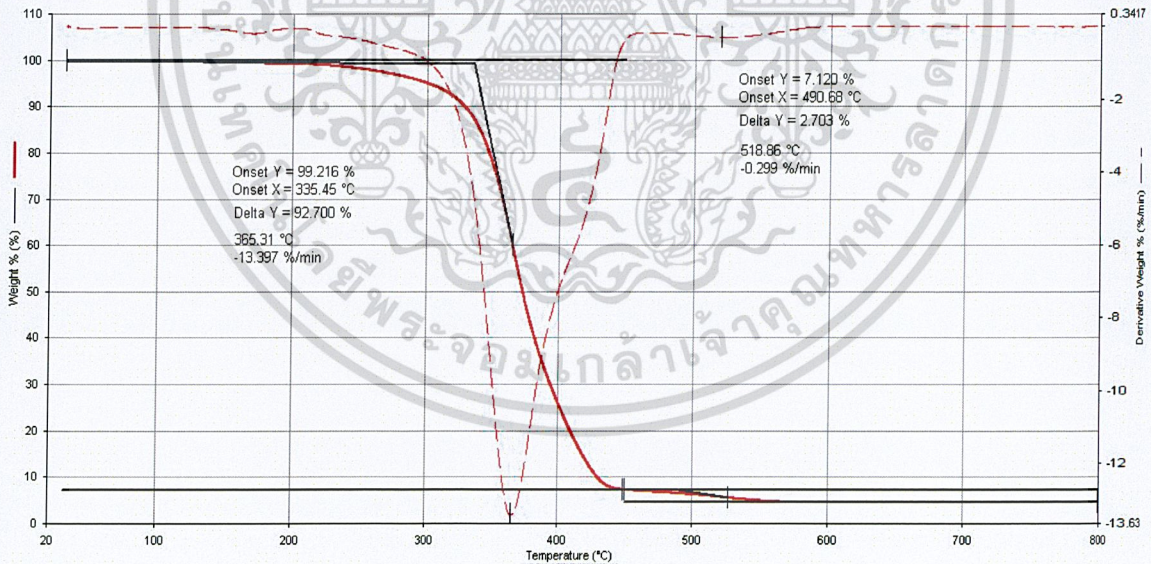
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA)

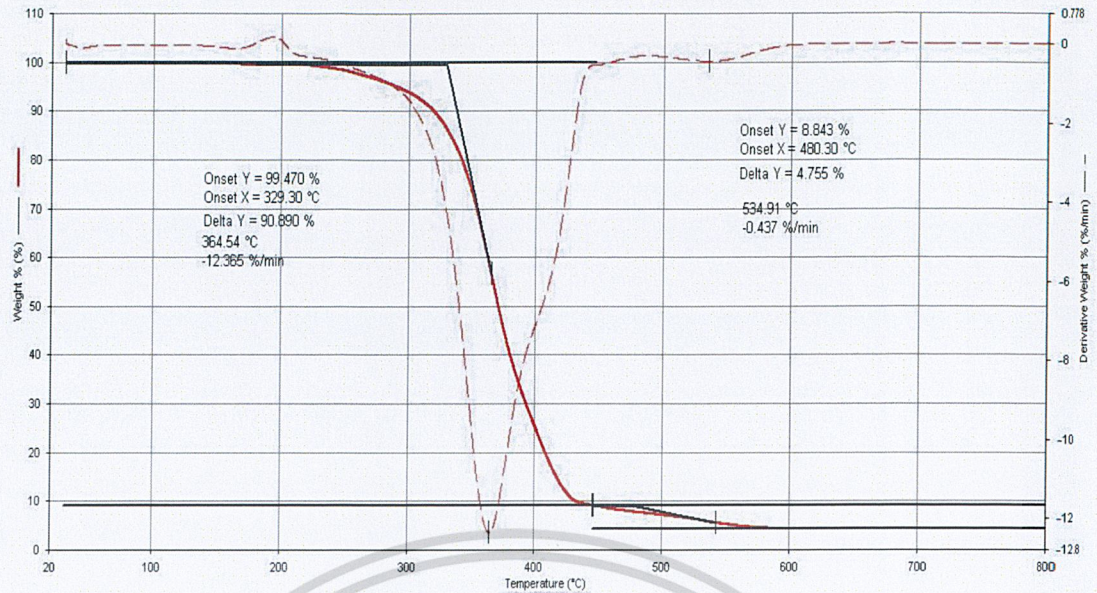


รูปที่ ง.1 กราฟแสดงการวิเคราะห์เชิงความร้อนของโพลีเอทิลีน

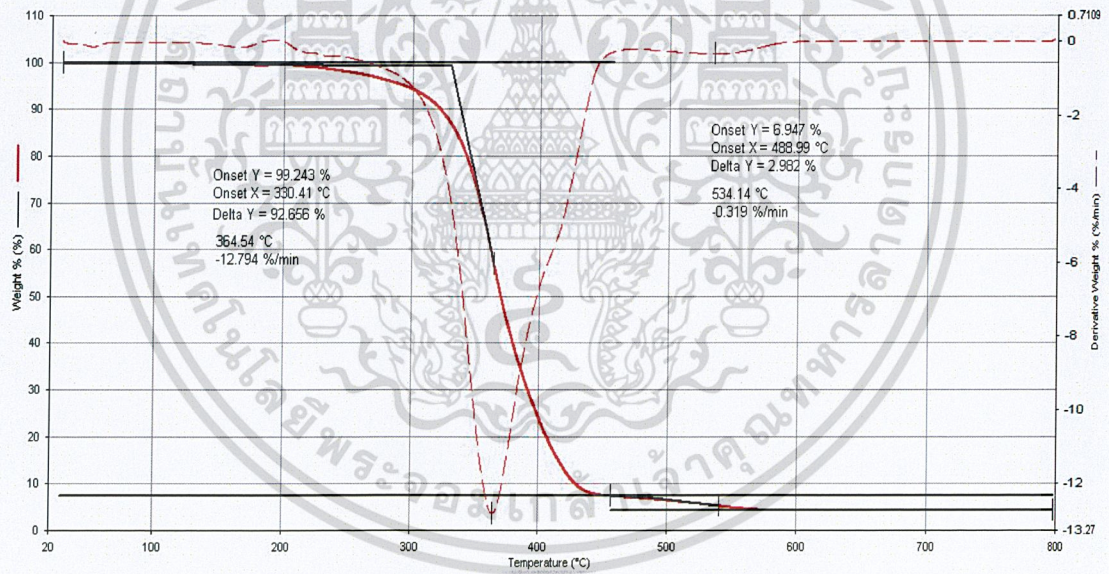


รูปที่ ง.2 กราฟแสดงการวิเคราะห์เชิงความร้อนของโพลีเอทิลีนผสมกับกราฟีนออกไซด์  $2 \times 10^{-4}$  phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

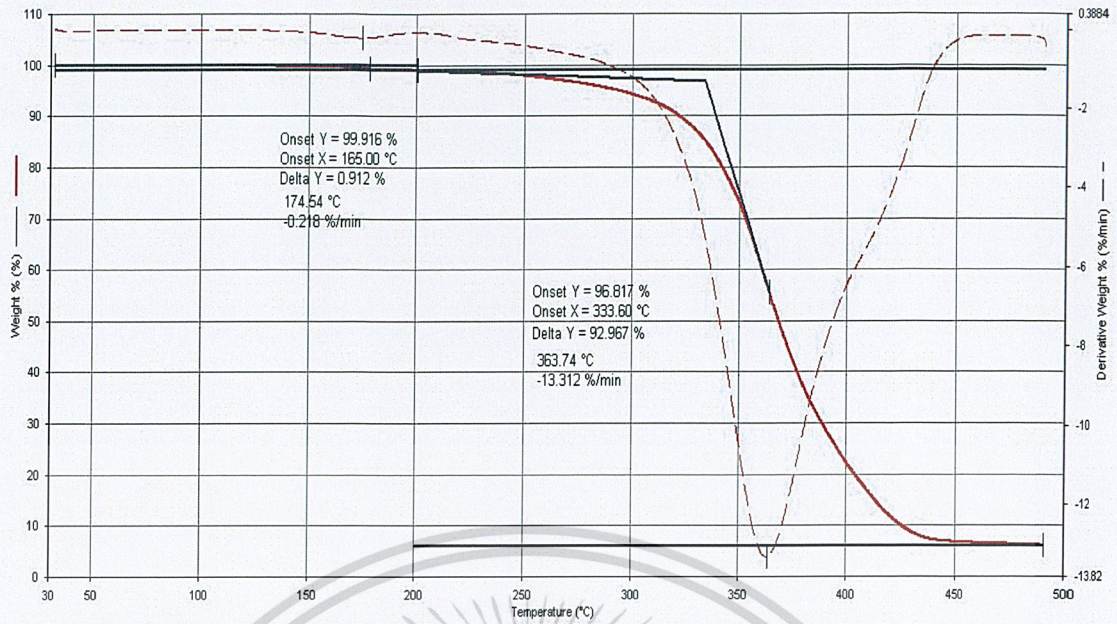


รูปที่ ง.3 กราฟแสดงการวิเคราะห์เชิงความร้อนของโพลีเอทิลีนที่ผสมกับกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr



รูปที่ ง.4 กราฟแสดงการวิเคราะห์เชิงความร้อนของโพลีเอทิลีนที่ผสมกับกราฟีนออกไซด์  $1 \times 10^{-3}$  phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

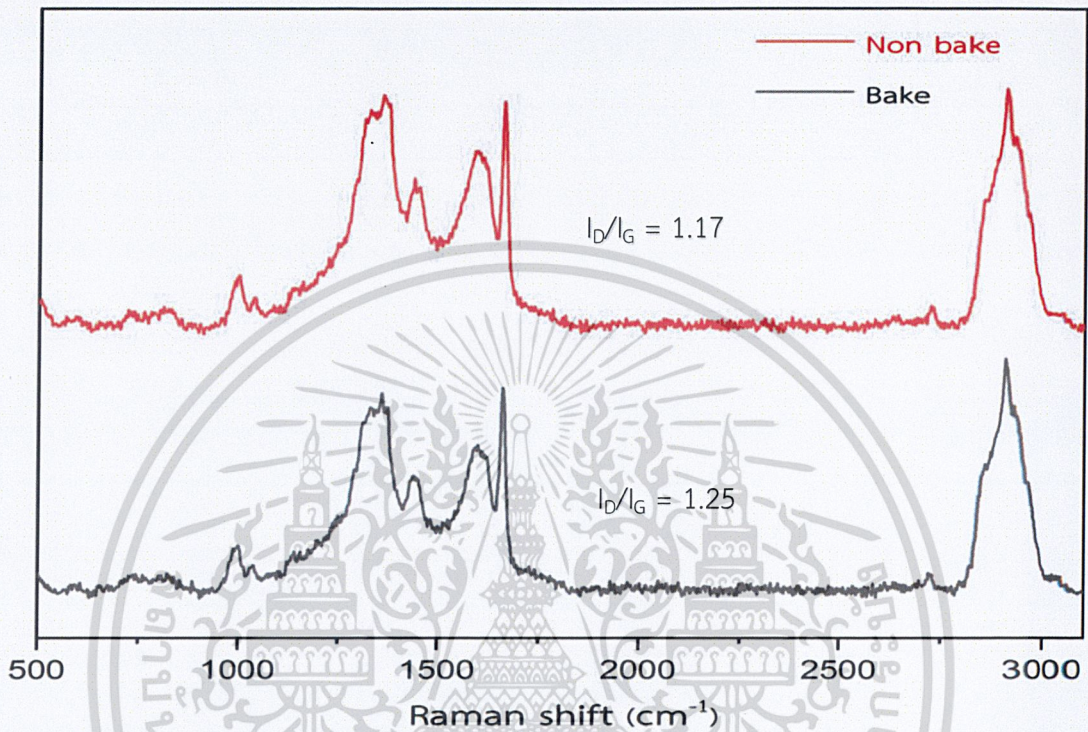


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการวิเคราะห์เชิงความร้อนของโพลีเอทิลีนที่ผสมกับกราฟีนออกไซด์  $6 \times 10^{-4}$  phr ผสมกับอนุภาคซิลเวอร์ นาโน  $2 \times 10^{-3}$  phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์หาความยาวพันธะในโมเลกุลแบบไม่มีขั้วด้วยเทคนิครามาน (Raman spectroscopy)



รูปที่ จ.1 กราฟแสดงการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้