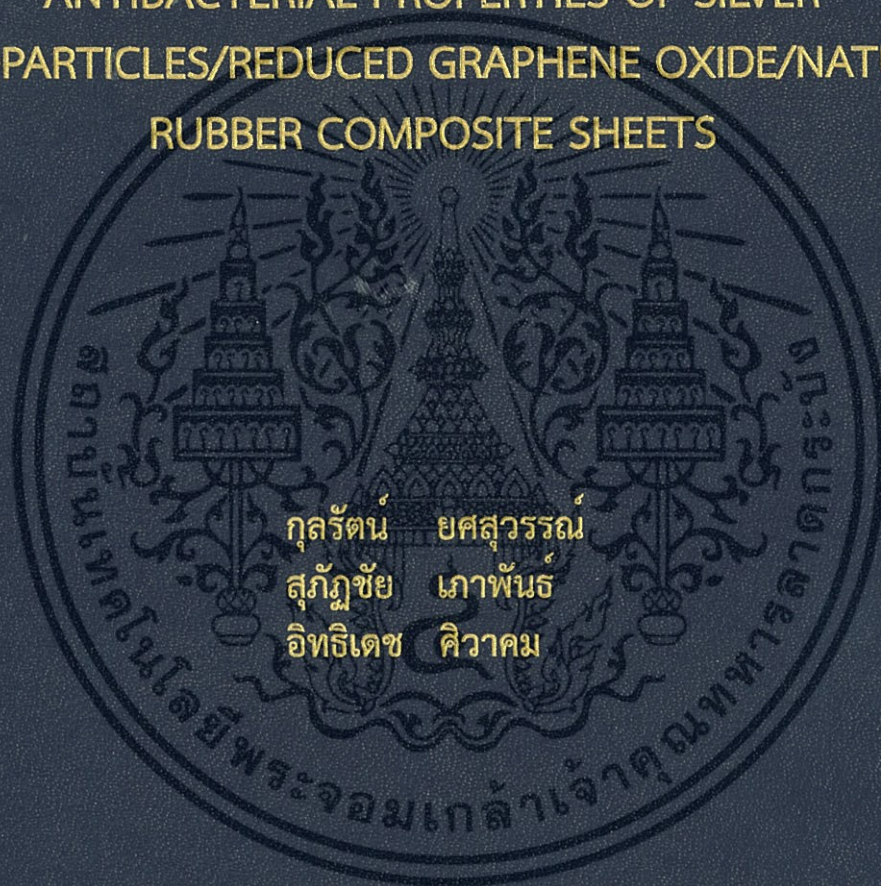


การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ สมบัติเชิงกลและสมบัติ
การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมอนุภาค
ซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION, MECHANICAL AND
ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF SILVER
NANOPARTICLES/REDUCED GRAPHENE OXIDE/NATURAL
RUBBER COMPOSITE SHEETS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ สมบัติเชิงกลและสมบัติ
การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมอนุภาค
ซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION, MECHANICAL AND
ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF SILVER
NANOPARTICLES/REDUCED GRAPHENE OXIDE/NATURAL
RUBBER COMPOSITE SHEETS



T149494

กุลรัตน์ ยศสุวรรณ
สุภัฏชัย เกาพันธ์
อิทธิเดช ศิวาคม

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....149494
รับเดือนปี..... 8 ส.ค. 2561

b.....12883955
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการปีการศึกษา 2559 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION, MECHANICAL AND
ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF SILVER
NANOPARTICLES/REDUCED GRAPHENE OXIDE/NATURAL
RUBBER COMPOSITE SHEETS



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

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ สมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
Preparation, Characterization, Mechanical and Antibacterial Properties of Silver Nanoparticles/ Reduced Graphene Oxide/ Natural Rubber Composite Sheets

ชื่อนักศึกษา นางสาวกุลรัตน์ ยศสุวรรณ รหัสนักศึกษา 56050444
นายสุภวัชชัย เกาพันธ์ รหัสนักศึกษา 56050635
นายอิทธิเดช ศิวาคม รหัสนักศึกษา 56050659

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. มนตรี ทองคำ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. เอกรัฐ เดชศรี กรรมการ	
ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ สมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกุลรัตน์ ยศสุวรรณ รหัสนักศึกษา 56050444 นายสุภวัชชัย เกาพันธ์ รหัสนักศึกษา 56050635 นายอิทธิเดช ศิวาคม รหัสนักศึกษา 56050659
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต เคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษามุ่งเน้นการพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มสมบัติในด้านเชิงกล เชิงความร้อน และสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมโดยนำน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติมคือ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการผสมที่ขึ้นรูปอย่างง่ายแบบลาเท็กซ์ ภายใต้การศึกษาผลจากปริมาณการเปลี่ยนแปลงสารแขวนลอยของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และปริมาณของผสมของสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ถูกเติมลงไปโดยให้ปริมาณน้ำยางธรรมชาติคงที่ จากนั้นจะทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางผสมที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible) การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) รามานสเปกโตรสโคปี (Raman) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (SEM) การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (TEM) และวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงปรากฏพีคเอกลักษณ์การดูดกลืนแสงของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ผลการตรวจสอบรูปแบบโครงผลึกและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างแผ่นยางผสมและแผ่นยางธรรมชาตินั้นพบว่าไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามยังสามารถยืนยันพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในตัวอย่างยางผสมได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัญญาณวิทยาที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ พบว่าลักษณะพื้นผิวจากภาพตัดขวางของยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/อนุภาคนาโนซิลเวอร์ มีลักษณะรอยยับย่นซึ่งเกิดจากการฝังตัวของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ขนาดนาโนในเนื้อยาง ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถกระจายตัวได้อย่างดีใน

เนื่ออย่าง ส่วนผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ได้ค่าเฉลี่ยของสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดนาโนเท่ากับ 41.99 ± 22.55 นาโนเมตร มีรูปร่างลักษณะทรงกลม ในส่วนผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าโมดูลัสของแผ่นยางธรรมชาติเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.90 เมกกะปาสคาลเป็น 1.27 เมกกะปาสคาลซึ่งเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 263.33% เมื่อเพิ่มปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาค่าการดึงยืดและค่าแรงดึงที่จุดขาดพบว่าค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เป็นผลจากการเข้าไปเสริมแรงของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในเนื่ออย่างทำให้มีผิวสัมผัสมากขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติตั้งต้น ผลการศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสมพบว่าไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติตั้งต้น และจากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมนั้นทำการทดสอบกับแบคทีเรีย 2 ชนิดคือแกรมบวก *Staphylococcus aureus* และแกรมลบ *Escherichia coli* (E.coli) ผลที่ได้พบว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง 2 ชนิด โดยปรากฏบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงสุด เมื่อเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เติมลงไป

คำสำคัญ : น้ำยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสม รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ อนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโน กระบวนผสมเทขึ้นรูปอย่างง่ายแบบลาเท็กซ์

Title Preparation, Characterization, Mechanical and Antibacterial Properties of Silver Nanoparticles/Reduced Graphene Oxide/ Natural Rubber Composite Sheets

Student Miss Kullarat Yossuwan Student ID 56050444
 Mr. Supatchai Phaophan Student ID 56050635
 Mr. Iettidech Sivakom Student ID 56050659

Degree Bachelor of Science in Industrial Chemistry

Department Chemistry

Faculty Science

University King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

Academic Year 2016

Advisor Dr. Chaval Sriwong

Abstract

To improve the functional properties of natural rubber (NR) such as antibacterial and mechanical properties, therefore, in this special project investigated the preparation and characterization of reduced graphene oxide (rGO) and silver nanoparticles (AgNPs) incorporated with NR composite sheets, including the antibacterial, mechanical and thermal properties were also studied. In the preparation, both the aqueous suspensions of rGO and AgNPs were firstly synthesized. Then, the NR composite sheets were easily prepared by directly latex mixing-casting method based on the use of fixed natural rubber latex content under the varying amounts of rGO and rGO mixed with AgNPs suspensions, respectively. After that, the obtained rGO, AgNPs and NR composite sheets were characterized by using UV-visible spectroscopy (UV-vis), X-ray diffraction (XRD), Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectrophotometer (EDS), transmission electron microscopy (TEM), universal testing machine (UTM) and thermogravimetric analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(TGA) techniques. From the UV-vis results, the characteristic absorption peaks of rGO and AgNPs could be observed and well confirmed, whereas the TEM technique showed that the average particles size of the colloidal AgNPs was about 41.99 ± 22.40 nm, and had spherical-like shape. While the crystalline phases and functional groups of all the NR composite sheets are corresponding to pristine natural rubber. The characteristic peaks of AgNPs in the NR+rGO+AgNPs composite sheet samples could be observed by XRD technique. From the SEM and EDS results, the surface morphologies of the NR+rGO and NR+rGO+AgNPs composite sheets were wrinkled by impregnating of rGO sheets into the rubber, while the AgNPs could be well dispersed on the matrix of NR sheet. From the tensile test found that the mechanical properties (young's modulus, stiffness and load at break) of the NR+rGO composite sheets were increased with increasing amounts of rGO loading. Especially, the young's modulus value of NR composite sheets loaded with 0.28 %wt. rGO was increased to 263.33% by comparing to pristine NR sheet. This may be due to the fact that it corroborates the strong interfacial interaction between rGO and natural rubber. As compared with pristine NR sheet, the TGA results of all NR composite sheets were not different. Moreover, the antibacterial properties of the NR composite sheets were also tested against Gram-positive *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) and Gram-Negative *Escherichia coli* (*E. coli*). The results showed that the NR+rGO+AgNPs composite sheets exhibited excellent antibacterial properties against these bacteria, which the antibacterial activities of the sheets were increased with increasing amount of AgNPs loading. From all above, thus, the concept of this research may be very useful to increase the value and a variety of using for natural rubber latex or natural rubber sheet.

Keywords: Natural rubber latex, Natural rubber composite sheet, Reduced graphene oxide, Silver nanoparticles, Latex mixing-casting method

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูงทั้งที่ออกนามและมีได้ออกนามที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือในด้านต่างๆ ไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี และช่วยเหลือให้โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. มนตรี ทองคำ ประธานกรรมการ และ ผศ.ดร. เอกรัฐ เดชศรี ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบโครงการพิเศษ และให้คำปรึกษา แนะนำแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อความสมบูรณ์ของงานโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการใช้อุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงการใช้งานเครื่องมือต่าง ๆ ตลอดจนเอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในการทดลอง

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ในภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ ทำให้สามารถดำเนินโครงการพิเศษนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและการสนับสนุนมาจนสำเร็จการศึกษา

กุลรัตน์	ยศสุวรรณ
สุภวัชชัย	เกาพันธ์
อิทธิเดช	ศิวิาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ยางธรรมชาติ	4
2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ	5
2.1.2 น้ำยางข้น	7
2.1.3 สมบัติยางธรรมชาติ	7
2.2 กราฟีน	8
2.2.1 สมบัติกราฟีน	9
2.2.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน	10
2.3 ซิลเวอร์	13
2.3.1 ประโยชน์ของซิลเวอร์	14
2.3.2 อนุภาคนาโนซิลเวอร์	14
2.3.2.1 กลไกการทำงานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์	15
2.3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์	16
2.4 โพลีไวนิลไพโรลิโดน	17
2.5 เชื้อแบคทีเรีย	19
2.5.1 ผนังเซลล์	19
2.5.2 เยื่อหุ้มเซลล์	19
2.6 กลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์/โลหะนาโนคอมโพสิต	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
3.1 สารเคมี	24
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	24
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	25
3.3.1 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากผงกราฟาไฟต์	25
3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์	27
3.3.3 การเตรียมแผ่นยางผสม	27
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์	29
3.4.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)	29
3.4.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy; FT-IR)	30
3.4.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)..	30
3.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)	30
3.4.5 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX)	31
3.4.6 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)	31
3.4.7 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)	31
3.4.8 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	31
3.4.9 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-Bacterial test)	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	32
4.1 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสาร	33
4.1.1 กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	33
4.1.2 อนุภาคนาโนซิลเวอร์	34
4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล	36
4.2.1 กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	36
4.2.2 แผ่นยางธรรมชาติผสม	38
4.3 ผลการพิสูจน์ด้วยเทคนิครามาน	40
4.3.1 กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	40
4.4 ผลการตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐาน	41
4.4.1 กราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	41
4.4.2 แผ่นยางธรรมชาติผสม	42

4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ	44
4.5.1 แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม	45
4.5.2 แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.19 โดยน้ำหนัก	46
4.5.3 แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก	47
4.5.4 แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก	48
4.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค	49
4.6.1 กราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	49
4.6.2 แผ่นยางธรรมชาติผสม	50
4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	52
4.8 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อน	54
4.9 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	56
4.10 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	62
4.10.1 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.1.1 สรุปผลการศึกษาลักษณะของสารตัวเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์	68
5.1.2 สรุปผลการศึกษาลักษณะแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์	69
5.1.3 สรุปผลการศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆ ในน้ำยางธรรมชาติ.....	6
2.2 แสดงส่วนประกอบของอนุภาคยางธรรมชาติ.....	6
2.3 แสดงสมบัติทั่วไปของซิลเวอร์.....	13
2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของซิลเวอร์.....	13
3.1 แสดงแสดงเงื่อนไขในการขึ้นรูปแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	28
3.2 แสดงเงื่อนไขในการขึ้นรูปแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ	29
4.1 เปรียบเทียบแถบการสั่นที่สำคัญของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	37
4.2 แสดงแถบการสั่นของยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์...	39
4.3 แสดงอนุกรมเริ่มต้นการสลายตัว อนุกรมสิ้นสุดการสลายตัว และอนุกรมการสลาย ตัวของแผ่นยางธรรมชาติผสมในรูปแบบต่างๆ.....	56
4.4 แสดงค่าการทดสอบสมบัติทางเชิงกลแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม.....	57
4.5 แสดงค่าการทดสอบสมบัติทางเชิงกลแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมและแผ่นยาง ธรรมชาติผสมกับกราฟีนออกไซด์และแผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ ปริมาณต่างๆ.....	57
4.6 แสดงค่าการทดสอบทางเชิงกลของแผ่นยางผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพแสดงโครงสร้างของแผ่นกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	2
2.1 รูปแสดงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน.....	4
2.2 แสดงส่วนประกอบของอนุภาคยางธรรมชาติ.....	6
2.3 แสดงอัญรูปพื้นฐานของคาร์บอน.....	9
2.4 แสดงแผนผังวิธีในการสังเคราะห์กราฟีนด้วยกระบวนการต่างๆ.....	10
2.5 แสดงขั้นตอนในการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมี.....	12
2.6 แสดงกลไกการทำงานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ต่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย.....	15
2.7 แสดงโครงสร้างของพอลิไวนิลไพโรลิโดน.....	18
2.8 แสดงกลไกการเกิดที่เป็นไปได้ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดน ที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพและตัวรีดักแทนซีในการทำปฏิกิริยา โดยใช้วิธีดักจับด้วย ไมโครเวฟ (Microwave(MW) irradiation).....	18
2.9 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก (ซ้าย) และ แบคทีเรียแกรมลบ (ขวา).....	20
2.10 แสดงกลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์/โลหะนาโนคอมโพสิต.....	20
3.1 แสดงการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	27
4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO).....	33
4.2 แสดงภาพถ่ายสารแขวนลอยของกราฟีนออกไซด์ (a) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) (b).....	34
4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงอนุภาคนาโนซิลเวอร์ก่อนและหลังไมโครเวฟ.....	35
4.4 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของสารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์ (a) ไมโครเวฟ 0 วินาที (b) ไมโครเวฟ 180 วินาที.....	35
4.5 แสดงสมการที่อาจจะเป็นไปได้ของการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์(AgNPs).....	36
4.6 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ (a) กราไฟต์ออกไซด์ (GO) และ (b) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO).....	36
4.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีที่เป็นไปได้ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO).....	37
4.8 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบแผ่นยางธรรมชาติ (a) แผ่นยางธรรมชาติ ที่ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.10 (b) และ 0.28 (c) โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.03 (d) และ 0.11 (e) โดยน้ำหนัก.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO).....	40
4.10 XRD Pattern ของผงกราฟไฟต์ (Graphite) ผงกราฟีนออกไซด์ (GO) และผงรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO).....	41
4.11 XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ (a) แผ่นยางธรรมชาติ (b) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10 wt.% (c) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.19 wt.%.....	42
4.12 ภาพแสดง XRD pattern ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จากงานวิจัยอ้างอิง.....	43
4.13 XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่(0.28 wt.%) ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ (a) แผ่นยางธรรมชาติ (b) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 0.03 wt.% (c) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 0.05 wt.% (d) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 0.11 wt.%.....	44
4.14 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR) และแผ่นที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (a) และธาตุซิลเวอร์ (b).....	45
4.15 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%) และแผ่นที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ ธาตุคาร์บอน (a) และธาตุซิลเวอร์ (b).....	46
4.16 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.05 wt.%).....	47
4.17 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.11 wt.%).....	48
4.18 ภาพจากกล้อง SEM เปรียบเทียบระหว่างบริเวณพื้นผิวที่กำลังขยาย 3000x เท่า (a) กราไฟต์ (b) กราฟีนออกไซด์.....	49
4.19 ภาพจากกล้อง SEM เปรียบเทียบระหว่าง (a) กราฟีนออกไซด์ กำลังขยาย 3000x เท่า b) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ กำลังขยาย 500x เท่า.....	49

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.20	ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณพื้นผิว (Surface) ของแผ่นยางธรรมชาติ กำลังขยาย 5000x เท่า.....	50
4.21	ภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติผสม รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.19 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย (a) 5000x เท่า (b) 10000x เท่า.....	50
4.22	ภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติผสม รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย (a) 5000x เท่า (b) 10000x เท่า.....	51
4.23	ภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติผสม รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย (a) 5000x เท่า (b) 10000x เท่า.....	51
4.24	ภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติผสม รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย (a) 5000x เท่า (b) 10000x เท่า.....	51
4.25	แสดงภาพถ่ายจากกล้อง TEM ของ (a) กราฟีนออกไซด์ และ (b) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	52
4.26	แสดงภาพ a) TEM ของสารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์และ b) กราฟแสดงการกระจายขนาด อนุภาคของอนุภาคนาโนซิลเวอร์.....	53
4.27	ภาพ TEM สารละลายรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์.....	53
4.28	แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นการ สูญเสียน้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติ ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก.....	54
4.29	แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ DTG จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นการ สูญเสียน้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติ ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่(ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก.....	55
4.30	แสดงการเปรียบเทียบ Young's modulus ของแผ่นยางผสม.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum ของแผ่นยางผสม.....	59
4.32 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness ของแผ่นยางผสม.....	59
4.33 แสดงการเปรียบเทียบ Load at Break ของแผ่นยางผสม.....	60
4.34 แสดงตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นผสมยางผสมกราฟีนออกไซด์และแผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในปริมาณร้อยละ 0.10 0.19 และ 0.28 โดยน้ำหนัก.....	60
4.35 แสดงตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางผสมรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก.....	61
4.36 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสม 4 ชนิด ได้แก่ (A) แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure) (B) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (NR, rGO 0.28 wt.%) (C) และ (D) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	63
4.37 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยใช้แผ่นธรรมชาติผสม 4 ชนิด ได้แก่ (A) แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure) (B) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (NR, rGO 0.28 wt.%) (C) และ (D) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดย น้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	63
4.38 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ในปริมาณซิลเวอร์ที่ต่างกัน ได้แก่ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	64

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.39 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ในปริมาณซิลเวอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ..... 64
- 4.40 กราฟแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ โดยแสดงการเปรียบเทียบในเงื่อนไขการศึกษาที่ 2 แผ่นยางธรรมชาติที่ผสมกับ รีดิวซ์กราฟีนในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมปริมาณของซิลเวอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ..... 65



บทที่ 1

บทนำ

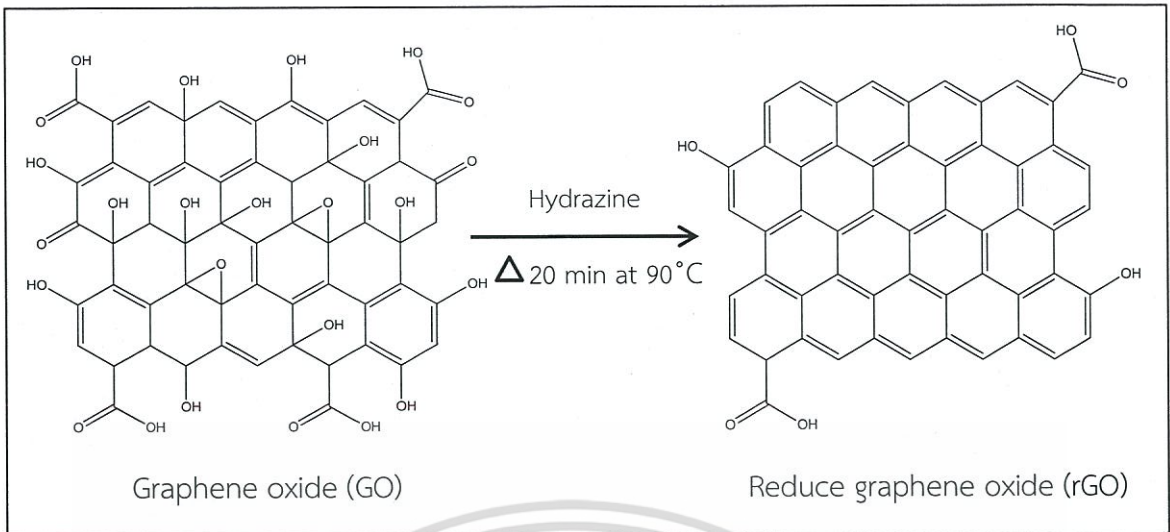
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางพารา (Rubber) ถือว่าเป็นสินค้าทางการเกษตรที่มีความสำคัญอันดับต้นๆของประเทศไทย โดยรัฐบาลและผู้ที่เกี่ยวข้องได้ให้ความสำคัญ เพราะยางพาราหรือยางธรรมชาติ (Natural Rubber) นั้นเป็นพืชเศรษฐกิจที่สร้างรายได้ให้ประเทศปีละหลายแสนล้านบาทจากการส่งออกวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์จากยางพารา อย่างไรก็ตามที่ผ่านมาราคายางพารามีความผันผวนไม่มีเสถียรภาพทำให้ในปัจจุบันราคาน้ำยางธรรมชาติตกลงอย่างมาก ส่งผลกระทบต่อทั้งเกษตรกรและผู้ประกอบการอุตสาหกรรมยางพารา ดังนั้นในการหาวิธีในการเพิ่มมูลค่าของยางพารา จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเพิ่มและปรับปรุงสมบัติบางประการของน้ำยางโดยการเติมสารตัวเติมลงไป [1] เพื่อเพิ่มสมบัติที่สำคัญของยางที่มีอยู่แล้วเช่น สมบัติเชิงกลในด้านความเหนียว และยืดหยุ่น เป็นต้น รวมถึงสมบัติด้านความร้อน และสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียซึ่งเป็นสมบัติเสริมเพื่อความโดดเด่นของยางพารา ทำให้การนำยางธรรมชาติมาใช้งานมีความหลากหลายมากขึ้น [2]

น้ำยางสด (Field latex) จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว เป็นสารพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวแบบคอลลอยด์ในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยมีเนื้อยางอยู่ประมาณ 30 % โดยน้ำหนัก เมื่อนำน้ำยางไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% ซึ่งจะมีการเติมแอมโมเนียลงไปเล็กน้อยเพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้น (Concentrated latex) ให้เก็บไว้ได้นานยิ่งขึ้น [3] โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีทั้งมีความทนทานต่อแรงเชิงกลด้านแรงดึง ทนทานต่อการฉีกขาด มีความยืดหยุ่นสูง เป็นต้น [4] แต่ด้วยสมบัติบางประการเหล่านี้ยังไม่ดีพอ อีกทั้งเพื่อเป็นทางเลือกหรือความหลากหลายทางการนำมาใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการมีเพิ่มสมบัติด้านอื่นๆให้กับยางธรรมชาติ ดังนั้นงานวิจัยจึงสนใจที่จะนำรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide) ที่มีสมบัติด้านการเสริมแรงที่ดีเยี่ยมและนำอนุภาคนาโนซิลเวอร์มาเป็นตัวเติมเพื่อเพิ่มสมบัติในการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย เพื่อให้วัสดุยางผสมที่ได้มีสมบัติที่โดดเด่นมากยิ่งขึ้นและเพื่อเพิ่มมูลค่าของยางและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆในอนาคต [5]

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ถูกใช้เป็นสารตัวเติม เนื่องจากสมบัติที่โดดเด่นทางด้านต่างๆ เช่น ความแข็งแรง การนำไฟฟ้า การนำความร้อน การทนต่อความร้อน การทนต่อสารเคมี เป็นต้น [6] รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งเป็นอัญรูปพื้นฐานหนึ่งคาร์บอนอะตอม ที่มีความบางในระดับอะตอมหนา 0.34 นาโนเมตร ซึ่งการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ทำได้โดยเริ่มต้นจากการสังเคราะห์กราฟไฟต์ออกไซด์ โดยการนำผงผลึกกราฟไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับกรดซัลฟิวริกและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยใช้กระบวนการของฮัมเมอร์ (Hummer's method) หลังจากนั้นนำสารแขวนลอยกราฟไฟต์ออกไซด์ในน้ำกลั่นไปทำการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) ทำให้ได้กราฟีนออกไซด์ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นอย่างดี แล้วนำไปรีดิวซ์ด้วยกระบวนการให้ความร้อนอย่างง่ายโดยใช้ไฮดราซีนเป็นสารรีดักแทนซ์ สุดท้ายได้สารแขวนลอยสีดำที่มีเสถียรภาพคือสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [7] ดังแสดงในภาพที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของแผ่นกราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เนื่องจากโลหะซิลเวอร์ (Silver) มีสมบัติสามารถยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ โดยกลไกการทำงานคือ อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโน (Silver nanoparticles) เมื่อสัมผัสกับผนังเซลล์ จะสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียได้ จากนั้นอนุภาคซิลเวอร์นาโน (Silver nanoparticles) ซึ่งมีสมบัติเป็น Soft acid จะเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลที่เป็น Soft base ภายในเซลล์ ซึ่งก็คือส่วนที่เรียกว่าหมู่ ซัลไฟดริล (Sulfhydryl group) ของเอนไซม์โปรตีนเนส (Proteinase) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับเมตาบอลิซึมของเซลล์ โดยหมู่ซัลไฟดริล (-SH) จะจับตัวกับอนุภาคของเงินทำให้กระบวนการทำงานของเอนไซม์หยุดการทำงานจนกระทั่งเซลล์ของแบคทีเรียเสื่อมสภาพไปในที่สุด ในงานวิจัยนี้การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตรทำได้จากการเตรียมจากสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเป็นสารตั้งต้น และมี Poly(N-vinylpyrrolidone) (PVP) เป็นตัวรักษาเสถียรภาพในการสังเคราะห์ จึงได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน [8]

ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและสมบัติที่ต้องการพัฒนาของแผ่นยางธรรมชาติ ในงานวิจัยจึงได้ทำการศึกษาผลของการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงในยางธรรมชาติชนิดเข้มข้นในปริมาณต่างๆ ที่น่าจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางผสมนี้ อีกทั้งได้ทำการศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมนี้ โดยใช้เทคนิคต่างๆ อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมจากน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์
- 2) เพื่อศึกษาผลของการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสม
- 3) เพื่อศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ และสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง และสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสมที่เตรียมได้
- 4) เพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ทำการศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติเข้มข้นด้วยวิธี Latex mixing casting methods โดยศึกษาผลของการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.10 wt.% 0.19 wt.% และ 0.28 wt.%
- 2) ทำการศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้นกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยมีการศึกษาผลของการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.01 wt.% 0.03 wt.% 0.05 wt.% และ 0.11 wt.%
- 3) ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางผสมที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น XRD, Raman, FT-IR, SEM, TEM, EDS, UV-Vis เป็นต้น
- 4) ทำการศึกษสมบัติทางความร้อนของแผ่นยางผสมโดยเทคนิค TGA และสมบัติเชิงกลโดยใช้ UTM
- 5) ทำการศึกษสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธี Agar disk-diffusion method โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดคือชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และชนิดแกรมลบคือ *Escherichia coli* (*E. coli*)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้รับองค์ความรู้และมีความเข้าใจถึงการเตรียมยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์
- 2) ได้รับความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ดี
- 3) ได้รับองค์ความรู้และมีความเข้าใจเกี่ยวกับการนำรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ไปใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติของยางธรรมชาติเข้มข้น ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาสมบัติยางธรรมชาติต่อไป
- 4) เพิ่มมูลค่าและพัฒนาสมบัติของยางพารา จากแผ่นยางผสมที่เตรียมได้ ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดในการใช้งานต่างๆได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

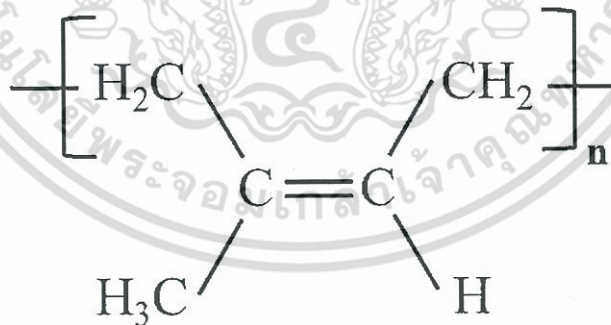
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยาง (Rubber) หรืออีลาสโตเมอร์ (Elastomer) คือวัสดุพอลิเมอร์ (Polymer) ประเภทหนึ่ง โดยส่วนใหญ่โครงสร้างโมเลกุลของยางมีองค์ประกอบหลักเป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีธาตุคาร์บอน (Carbon, C) และไฮโดรเจน (Hydrogen, H) เป็นส่วนใหญ่เหมือนกับพอลิเมอร์อื่นๆ แต่ยางมีสมบัติที่แตกต่างจากพอลิเมอร์ชนิดอื่นคือ ยางสามารถเปลี่ยนรูปร่างหรือขนาด ยืดหรือหดได้หลายเท่า เมื่อทำการให้แรงดึงยืดหรือกดอัดสามารถหดกลับ หรือขยายขนาดกลับคืนใกล้เคียงขนาดและรูปร่างอย่างรวดเร็วเดิมเมื่อปล่อยแรง “ยาง” ในอดีตเป็นคำที่ใช้เรียกเฉพาะ “ยางธรรมชาติ” (Natural rubbers) แต่ในปัจจุบันมีการใช้คำว่า “ยาง” แทนคำ “อีลาสโตเมอร์” คำว่ายาง (Rubber) จึงใช้เรียกได้ทั้งยางธรรมชาติ (Natural rubbers, NR) และยางสังเคราะห์ (Synthetic rubbers, SR)

ยางธรรมชาติ (Natural rubbers, NR) หรือที่รู้จักกันในนาม “ยางพารา” (Para rubber) มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4 Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงยาว มีหน่วยซ้ำกันคือไอโซพรีน (C₅H₈) โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ คือต้นยางพารา ที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ “ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส” (Hevea Brasiliensis) บางครั้งจึงเรียกกยางธรรมชาติว่า “ยางฮีเวีย” (Hevea latex) หรือยางพารา เป็นต้นไม้ยืนต้น สูงใหญ่ อายุยืน มีความหลากหลายพันธุ์ ซึ่งให้ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำยางที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน [9]

ต้นยางธรรมชาติหรือยางพารา มีต้นกำเนิดที่ประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ แถบลุ่มแม่น้ำอะเมซอน (Amazon) ต่อมาได้มีผู้นำมาปลูกที่ทวีปยุโรปและเอเชียเนื่องจากต้นยางพาราชอบอากาศร้อนชื้น ดินทราย ร่วน ระบายน้ำได้ดี จึงนิยมปลูกมากแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ประเทศไทย มาเลเซีย อินโดนีเซีย ต้นยางเจริญเติบโตได้ดีในแถบเส้นศูนย์สูตรของโลกบริเวณที่มีฝนตกชุก (ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยมากกว่า 80 นิ้วต่อปี) อุณหภูมิประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส และชอบขึ้นบริเวณที่มีความสูงของพื้นดินไม่สูงมาก มากกว่า 80% ของการปลูกยางธรรมชาติอยู่ที่ประเทศไทย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

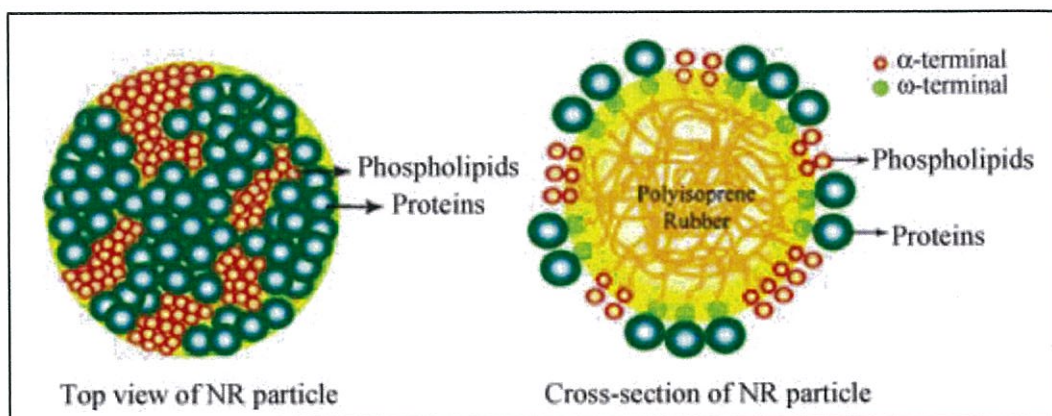
มาเลเซีย และอินโดนีเซีย ปัจจุบัน “ประเทศไทย” ผลิตยางธรรมชาติได้มากที่สุดในโลก คือประมาณ 4.43 ล้านตันต่อปี มีพื้นที่ปลูกยางพารามากกว่า 18.00 ล้านไร่ (ตัวเลขในปี พ.ศ. 2558)

การแปรรูปยางธรรมชาติ ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติจะต้องทำการแปรรูปน้ำยางดิบ ให้อยู่ในรูปอื่น เพื่อความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการเก็บรักษา ได้แก่ ยางแห้ง (Dry rubber) และ น้ำยางข้น (Concentrated latex) โดยการใช้ประโยชน์จากยางนั้นต้องนำยางมาทำการเชื่อมโยงหรือวัลคาไนเซชัน (Crosslinking หรือ Vulcanization) หรืออาจเรียกว่า การทำให้ยางสุก (Curing) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรง (Linear chain) หรือเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) หรือเทอร์โมเซต (Thermosets) ยางจะมีสมบัติที่ดีขึ้น กล่าวคือจะเปลี่ยนจากวัสดุที่อ่อน นิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด (Sticky) และไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) ไหลได้เมื่อทิ้งไว้นาน กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนต่ออุณหภูมิสูง การใช้ประโยชน์ของยางมากกว่า 60% ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ผลิตได้ใช้ในการผลิต “ยางรถยนต์” (Tires) ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญที่สุดของยาง และใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น รองเท้ายาง (Footwear) ถุงมือยาง (Rubber gloves) สายพานลำเลียง (Conveyor belts) ยางยึด เป็นต้น

2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติ (Field latex) จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นคล้ายน้ำนม เป็นสารแขวนลอย หรือคอลลอยด์ (Colloids) ประกอบด้วยน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก เรียกว่า “เซรัม” (Serum) และมีอนุภาคยางพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) ประมาณ 30-40% ขนาด 20-2,000 นาโนเมตร (nm) แขวนลอยกระจาย อยู่ในของเหลวเซรัมในลักษณะไมเซลล์ (Micelles) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารอื่นๆที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber substances) เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารอนินทรีย์อื่นๆ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก สังกะสี ทองแดง และแมงกานีส เป็นต้น สารประกอบต่างๆของน้ำยางแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 การที่น้ำยางมีสถานะเป็นของเหลวแขวนลอย ก้อนอนุภาคของยางลอยตัวอยู่ในน้ำตัวกลาง (เซรัม) ได้เนื่องจาก ก้อนอนุภาคถูกห่อหุ้มด้วยชั้นโปรตีน ซึ่งมีประจุลบ (Negative charges) ล้อมรอบ ชั้นโปรตีนนี้จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แต่ละอนุภาคยางรวมตัวกันเป็นก้อนยางแข็งตกตะกอนที่เรียกว่า โคแอกคูลัม (Coagulum) เนื่องจากประจุลบรอบอนุภาคยางจะผลักกันทำให้อนุภาคยางไม่จับตัวรวมตัวกันเป็นก้อน โดยแสดงอนุภาคของยางธรรมชาติได้ดังรูปที่ 2.2 น้ำยางธรรมชาติมี pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนาแน่น ประมาณ 0.97-0.98 g/cm³ และมีความหนืด (Viscosity) ไม่แน่นอน เมื่อนำอนุภาคของเม็ดยางมาวิเคราะห์พบว่ามีส่วนประกอบโดยประมาณดัง ตารางที่ 2.2 [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของอนุภาคยางธรรมชาติ [10]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบและปริมาณสารต่างๆ ในน้ำยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
เนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) -พอลิไอโซพรีน	33
คาร์โบไฮเดรต	1.6
โปรตีน	1.4
ไขมัน	1.0
ไกลโคลิปิด(Glycolipids) และฟอสโฟลิปิด (Phospholipids)	0.6
สารอินทรีย์	0.5
อื่นๆ	0.4
น้ำ	58.5

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของอนุภาคยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	ปริมาณร้อยละ
เนื้อยางไฮโดรคาร์บอน	86
น้ำที่เจือติดเข้าไปในอนุภาค	10
สารพวกลิปิด ไขมัน	3
สารโปรตีน	1
โลหะ เช่น แมกนีเซียม (Mg) ฟอสฟอรัส (P)	ไม่เกิน 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 น้ำยางข้น

น้ำยางข้น (Concentrated latex) เป็นน้ำยางที่ได้จากการแปรรูปน้ำยางดิบเพื่อความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการเก็บรักษา โดยปกติน้ำยางสดมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) เฉลี่ยประมาณ 35% เป็นน้ำประมาณ 65% ซึ่งการผลิตน้ำยางข้นสามารถทำได้ 3 วิธีหลักคือ วิธีระเหยน้ำ (Evaporation) โดยการให้ความร้อน เป็นวิธีที่ไม่นิยมเนื่องจากใช้เวลานาน สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากใช้อุณหภูมิในการระเหยสูง วิธีทำให้เกิดครีม (Creaming) เป็นวิธีผลิตน้ำยางข้นที่ไม่เป็นที่นิยมเพราะมีความยุ่งยากและใช้เวลานาน และวิธีการปั่นกวนด้วยความเร็วสูงหรือ เซนติฟิว (Centrifuging) เป็นวิธีการผลิตน้ำยางข้นที่นิยมที่สุด ทำได้โดยใช้เครื่องปั่นความเร็วสูงหรือ เครื่องเซนติฟิว (Centrifuge) หมุนเหวี่ยงทำให้อนุภาคยางของแข็งเคลื่อนที่แยกออกจากส่วนที่เป็นของเหลว และแรงเหวี่ยงทำให้ส่วนที่มีน้ำหนักหรือ มีความหนาแน่นสูง ได้แก่ น้ำหรือเซรัมออกมาในรูป “หางน้ำยาง” ส่วนที่เหลือซึ่งเป็นอนุภาคยางเบาหรือมีความหนาแน่นต่ำก็คือ น้ำยางข้น (Concentrated latex) โดยปกติน้ำยางข้นที่ได้จะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ทำการรักษาเสถียรภาพของน้ำยางได้โดยการเติมแอมโมเนีย (Ammonia) เพื่อป้องกันการจับตัวกันของน้ำยาง โดยนิยมใช้แอมโมเนียเนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และต้นยางพารา ไม่เปลี่ยนสีน้ำยาง มีราคาถูกและอยู่ในรูปใช้งานง่าย ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลักได้แก่

- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง 60% HA (High ammonia, HA) ใช้แอมโมเนียร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้เก็บรักษาอย่างธรรมชาติไว้ได้นานที่สุด
- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ 60% LA (Low ammonia, LA) ใช้แอมโมเนียร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก [4]

2.1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีสมบัติลักษณะเด่นหลายด้านตามลักษณะของยาง โดยยางธรรมชาติมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ ยางดิบ และยางคงรูป ยางธรรมชาติมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติก (Plastic) และอีลาสติก (Elastic) ซึ่งยางสามารถแบนและไหลได้เมื่อได้รับแรงกดและเมื่อปล่อยแรงสามารถหดกลับคืนรูปร่างได้ มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางดิบมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ใช้งานได้ใให้อุณหภูมิที่จำกัด ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำยางจะแข็งกระด้าง ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงยางจะนิ่ม ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ความเหนียวติด (Tack) เป็นต้น ทำใหยางธรรมชาติได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆในการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อย่างหลากหลาย โดยสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติได้แก่ [3]

- 1) ความยืดหยุ่น (Elasticity) เป็นสมบัติเด่นของยางธรรมชาติ ซึ่งยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นสูง กล่าวคือยางสามารถยืดขยายตัวออกได้เมื่อมีแรงดึงหรือกด และสามารถหดกลับคืนรูปร่างหรือขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็วเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป
- 2) ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยไม่ต้องเติมสารตัวเติม จึงเหมาะแก่การนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ เช่น ถังมือยาง ถังยางอนามัย ถังมือยาง เป็นต้น
- 3) ความเหนียวติด (Tack) เป็นสมบัติที่ตีแย้มของยางธรรมชาติ (ในลักษณะที่เป็นยางดิบ)

ซึ่งนิยมมาผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างเข้าด้วยกัน

- 4) ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง
- 5) ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูง จึงเหมาะแก่การผลิตกระเปาะน้ำร้อน
- 6) สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งานและมีความต้านทานต่อความล้า (Fatigue resistance) ที่สูงมาก
- 7) ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวน โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูง $10^{15} - 10^{16}$ ohm*cm
- 8) ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance) ยางธรรมชาติไม่มีขี้ผึ้งละลายได้ดีในตัวทำละลายไม่มีขี้ผึ้ง ยางธรรมชาติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เบนซิน แต่ทนทานต่อของเหลวและสารเคมีที่มีขี้ผึ้งได้ดี เช่น อะซิโตน แอลกอฮอล์ เป็นต้น
- 9) การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อความร้อน โอโซน และแสงแดด ได้น้อยเนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double bond) ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- 10) การกระด้างกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง และในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต
- 11) อุณหภูมิการใช้งาน (Service temperature) อุณหภูมิการใช้งานยางธรรมชาติอยู่ระหว่าง -40 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน อาจเกิดการตกผลึก ซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและเสียความยืดหยุ่น แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไปสมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ

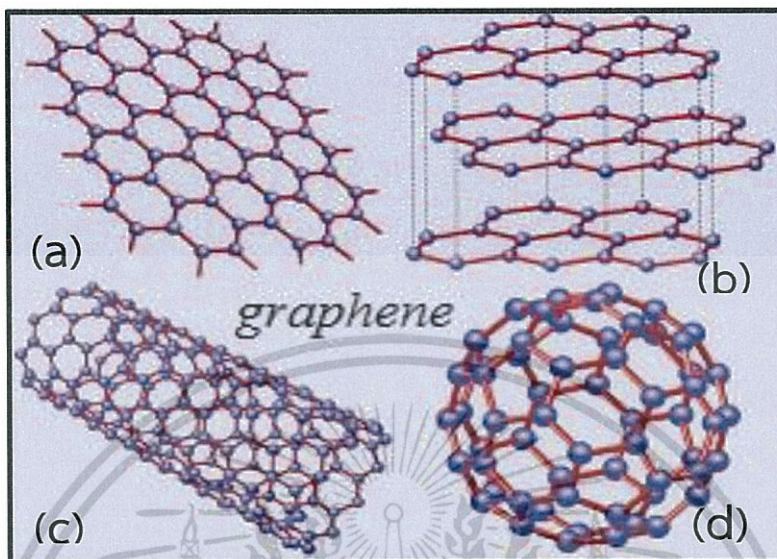
2.2 กราฟีน

กราฟีน (Graphene) เป็นวัสดุสองมิติที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในแลตทิซแบบหกเหลี่ยม มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง และมีไฮบริดเซชัน (Hybridization) แบบ sp^2 โดยมีความหนาทางอุดมคติของคาร์บอนเพียง 1 อะตอมหรือประมาณ 0.335 nm แสดงดังภาพที่ 2.2 กราฟีนนั้นถือเป็นอัญรูปพื้นฐานของสารประกอบคาร์บอนอื่นๆ ได้แก่ แกรไฟต์, คาร์บอน, นาโนทิวป์ และฟูลเลอร์รีน [11] แสดงดังภาพที่ 2.3 กราฟีนถูกค้นพบโดยกลุ่มนักฟิสิกส์จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ (Manchester University) ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ.2004 นำโดย Andre Geim และ Kostya Novoselov การค้นพบเริ่มต้นจากกราฟิต์ที่ประกอบด้วยชั้นของกราฟีนซึ่งยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals) และเทคนิคที่เรียกว่า Micromechanical cleavage ดึงแผ่นให้มีเพียง 1 อะตอม แผ่นกราฟีนที่ได้มีสมบัติที่น่าสนใจอย่างมาก มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าโลหะหรือสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นมากแม้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง กราฟีนเป็น

เอกสารวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสาร Nature หรือเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีแถบช่องว่างพลังงาน มีความสัมพันธ์ของพลังงานกับ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์คลื่นของอนุภาคพาหะ (Charge carriers) ในโซนบริลลูวอน (Brillouin zone) เป็นแบบเชิงเส้น จึงทำให้กราฟีนมีความแตกต่างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น และทำให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเฉพาะตัว [12]



รูปที่ 2.3 แสดงอัญรูปพื้นฐานของคาร์บอน [13]

2.2.1 สมบัติของกราฟีน [13]

1) สมบัติทางไฟฟ้า กราฟีนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก สามารถเป็นตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดีเกือบเท่า Superconductor (มากกว่าทองแดงหลายล้านเท่า) แต่กราฟีนนำไฟฟ้าได้ดีมากที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งต่างจาก Superconductor ที่ต้องลดอุณหภูมิจนติดลบกว่าร้อยองศาเซลเซียส ถึงจะแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าแบบนั้นได้

2) สมบัติเชิงกล กราฟีนกล่าวได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สุดในโลก กราฟีนมีความแข็งแรงมากโดยมีค่าความแข็งแรงต้านการแตกหัก (Breaking strength) สูงถึง 42 นิวตันต่อเมตร ค่าความเครียดเชิงกลประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) สูงถึง 1 เทระปาสคาลและค่าความแข็งแรงภายใน (Intrinsic strength) สูงถึง 130 กิกะปาสคาลซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

3) สมบัติทางแสง ความโปร่งแสงของกราฟีนสามารถทดสอบได้โดยการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านได้ในตัวกลางอากาศ กราฟีนชั้นเดียว และกราฟีนสองชั้นจากการทดลองพบว่ากราฟีนที่มีความหนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ของแสงขาวเท่านั้น

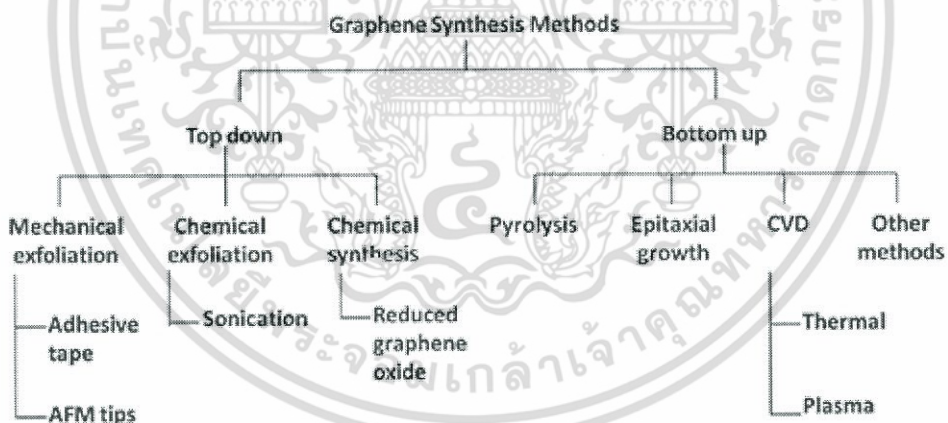
4) สมบัติทางความร้อน ความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก สามารถเป็นตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดีเกือบเท่า Superconductor (มากกว่าทองแดงหลายล้านเท่า) แต่กราฟีนนำไฟฟ้าได้ดีมากที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งต่างจาก Superconductor ที่ต้องลดอุณหภูมิจนติดลบกว่าร้อยองศาเซลเซียส ถึงจะแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าแบบนั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) สมบัติทางเคมี ผิวหน้าของกราฟีนสามารถดูดซับและคายอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซต่างๆ เช่น NO_2 , NH_3 และ OH ได้เช่นเดียวกับกราฟไฟต์ สารที่ถูกดูดซับมานั้นจะทำหน้าที่เหมือนเป็นอะตอมผู้ให้และผู้รับ นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Concentration)

2.2.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน

ในการสังเคราะห์กราฟีน [14] สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งสรุปได้ดังรูปที่ 2.4 แบ่งตามกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top-down) และแบบล่างสู่บน (Bottom-up) ในกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างแบ่งเป็นการลอกแผ่นกราฟีนโดยตรง เช่น ใช้สก็อตเทปลอกแผ่นกราฟีนจากแกรไฟต์บริสุทธิ์ การใช้เข็ม AFM ลากแผ่นกราฟีนออกมา และการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น การ Sonication หรือการสั่นด้วยเสียงความถี่สูง และการรีดิวซ์จากกราฟีนออกไซด์ ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส การปลูกฟิล์มบางกราฟีนแบบผลึกเดี่ยว การปลูกฟิล์มบางกราฟีนด้วยไอระเหยทางเคมี เป็นต้น ซึ่งวิธีการสังเคราะห์แบบล่างสู่บนจะเป็นวิธีที่ซับซ้อนยุ่งยาก ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง แต่ให้ปริมาณของกราฟีนจำนวนมาก ส่วนใหญ่จะทำในระดับอุตสาหกรรม ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างสามารถทำได้ง่ายกว่า สามารถทำในระดับห้องปฏิบัติการและงานวิจัยได้



รูปที่ 2.4 แสดงแผนผังวิธีการสังเคราะห์กราฟีนด้วยกระบวนการต่างๆ

2.2.1.1 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีเชิงกล

วิธีการเชิงกล (Mechanical Exfoliation) ถือเป็นวิธีแรกที่นักวิจัยค้นพบ ในปี ค.ศ. 2004 อาจารย์ และ ดร.อังเดรไกม์ (Andre Geim) และ ดร.คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) ได้แยกกราฟีนออกจากกราฟไฟต์ โดยมีแนวคิดคือพยายามทำให้กราฟไฟต์บางลงมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โครงสร้างของ กราไฟต์คือกราฟีนที่เรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้น แต่ละชั้นยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยแรงที่สามารถแยกกราฟีนชั้นเดียวออกจากกราฟไฟต์ได้มีค่าประมาณ 300 เอกซาสร์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$nN/\mu m^2$ [15] ดังนั้นเป้าหมายคือการทำให้กราฟไฟต์บางจนเหลือเพียงชั้นเดียว ดร.อังเดร โก้ม และ ดร.คอนสแตนติน โนโวเชลอฟ พวกเขาสามารถสร้างกราฟไฟต์ที่มีความหนาเพียงอะตอมเดียวได้สำเร็จ และเรียกวัสดุนี้ว่า “กราฟีน” และพบว่าวัสดุนี้มีความเสถียรอย่างมาก วิธีที่พวกเขาใช้แยกกราฟีนออกจากกราฟไฟต์คือนำกราฟไฟต์วางไว้ที่ด้านเหนียวของเทปหบบปลายอีกด้านของเทปให้แปะทับกราฟไฟต์ให้แน่น จากนั้นดึงเทปออกจากกันอย่างช้าๆ กราไฟต์จะติดอยู่ที่ด้านเหนียวของเทปที่แยกออกจากกันทั้ง 2 ด้าน ซึ่งเกิดจากเทปกาวดึงชั้นกราฟไฟต์ให้แยกออกจากกัน เมื่อทำซ้ำไปเรื่อยๆ ด้วยเทปกาวใหม่ ชั้นกราฟไฟต์จะถูกดึงแยกให้บางลงจนเหลือเพียงชั้นเดียว จากนั้นย้ายกราฟีน ไปอยู่บนฐานรองที่ต้องการโดยการนำเทปกาวที่มีกราฟีนติดอยู่กดลงบนฐานรอง SiO_2/Si [16] กราฟีนที่สร้างได้จากวิธีนี้ยังคงมีพื้นที่ขนาดเล็กซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะนำกราฟีนไปประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

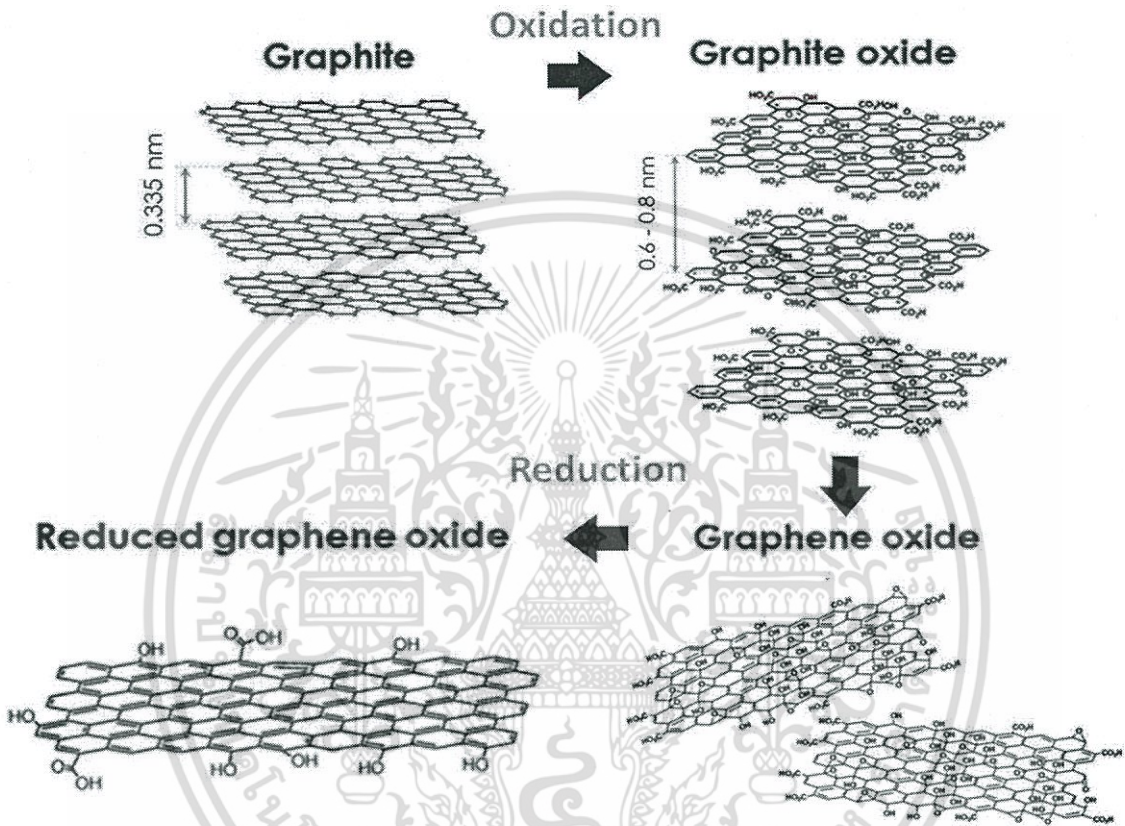
2.2.1.2 การสังเคราะห์กราฟีนทางเคมีด้วยวิธีโซนิเคชัน

วิธีโซนิเคชัน หรือการใช้คลื่นเสียงที่มีความเข้มสูงช่วยในการสังเคราะห์กราฟีน เนื่องจากคลื่นเสียงสามารถเดินทางผ่านไปในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือสารละลายได้ ถ่ายทอดพลังงานให้แก่ของเหลวทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันส่วนอัด (Compression) และส่วนขยาย (Rarefaction) จึงเกิดฟองสุญญากาศขนาดเล็กในของเหลวจำนวนมากโดยเฉพาะบริเวณส่วนอัดซึ่งมีความดันสูงเรียกว่า Cavitation และเกิดการระเบิดของฟองอากาศในเวลาต่อมา โดยปกติ Cavitation หรือจุดความร้อนขนาดเล็กๆ นี้ จะมีอุณหภูมิสูงมากถึง 5,000 K และอาจมีความดันถึง 2,000 atm ขึ้นอยู่กับความถี่หรือพลังงานของคลื่นเสียง ซึ่งการระเบิดดังกล่าวสามารถทำให้โมเลกุลของเหลวมีความเร็วถึง 280 m/s กระบวนการลอกแผ่นกราฟีนจากกราฟไฟต์ด้วยวิธีการ Sonication ซึ่งเกิดฟองอากาศขนาดเล็กหรือ Cavitation และแรงระเบิดที่มากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ ทำให้สามารถลอกชั้นของกราฟีนออกได้ ปรากฏการณ์นี้นำมาใช้ในทาง Sonochemistry ทำอันตรกิริยาระหว่างพลังงานกับสสารด้วยจุดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในฟองอากาศขนาดเล็ก เมื่อมีการลดอุณหภูมิด้วยอัตรา $>1,010$ K/s ซึ่งใช้สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนได้

2.2.1.3 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีรีดักชันจากกราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เป็นกราฟีนที่มีการดัดแปลงทางเคมี (Chemically modified graphene) เตรียมจากกระบวนการปฏิกิริยาออกซิเดชันของกราฟไฟต์ และลอกเป็นชั้นเดียวของกราฟีน ซึ่งสัดส่วนของปริมาณอะตอมของคาร์บอนต่อออกซิเจน (C/O) น้อยกว่า 3.0 และสัดส่วนที่ดีที่สุดมีค่าใกล้เคียง 2.0 แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของกราฟไฟต์ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดแก่จากแบบจำลองของ Lerf – Klinowski แสดงหมู่ออกไซด์แทรกระหว่างชั้นของแกรไฟต์หรือบนผิวของแผ่นแกรไฟต์ โดยเฉพาะกลุ่ม 1,2-Epoxides และ Hydroxyl ส่วนบริเวณขอบจะมีกลุ่ม Carboxyl และ Hydroxyl เกาะเป็นส่วนใหญ่ และอาจมี 5 และ 6-membered lactols ทำให้ d-spacing จาก 0.335 nm ขยายถึง 2-3 เท่า เรียกสารที่ได้ว่า กราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) จากนั้นสามารถแยกชั้นของแกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำหรือเอกซอร์เป็นเอกซอร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวทำละลายเป็นชั้นเดียวเรียก กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับ Hydrazine hydrate (N_2H_4) จะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide) ซึ่งหมู่ ออกไซด์ส่วนใหญ่ที่อยู่บริเวณผิวของแผ่นกราฟีนหลุดออก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อาจมีหลงเหลือตาม ขอบบ้าง อย่างไรก็ตาม การทำรีดักชันสามารถทำได้ด้วยการให้อุณหภูมิสูง เพื่อกำจัดออกซิเจนที่สร้าง พันธะกับกลุ่ม aromatic carbon, การใช้คลื่นไมโครเวฟ, การใช้แสง เป็นต้น [17]



รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนในการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมี [17]

2.2.1.4 วิธีการ Chemical Vapor Deposition (CVD)

คือการทับถมกันของไอสารเคมีบนฐานรองทำให้เกิดเป็นฟิล์มบาง วิธีนี้ถือเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์กราฟีน เนื่องจากวิธีนี้สามารถสังเคราะห์กราฟีนที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้และสามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา เป็นต้น แต่การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี CVD มีข้อเสียคือกราฟีนที่ได้มีรอยยับเกิดขึ้นเนื่องจากสัมประสิทธิ์การกระจายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างกราฟีนและโลหะฐานรอง [17]

จากสมบัติต่างๆ ที่นำกราฟีนมาใช้ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้กราฟีนในงานอันหลากหลาย ส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นวิจัยและพัฒนา เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คาปาซิเตอร์ความจุสูง ทรานซิสเตอร์ กราฟีน แกรฟโพลต์ (Grafold) หมึกนำไฟฟ้า โซลาร์เซลล์ ต่อต้านแบคทีเรีย อุปกรณ์ชีวภาพ เป็นต้น นอกจากนี้กราฟีนเล็ก (บาง) กว่าซิลิกอน แข็งแรงกว่า นำไฟฟ้าได้ดีกว่า หมายความว่าสามารถเป็นได้ทั้งวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัด เป็นโซลาร์เซลล์ หรือแม้แต่เป็นโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ แอ็กเซียลโดยการนำไปเสริมในโครงสร้างของวัสดุเดิม เช่น โลหะหรือพลาสติกซึ่งจะช่วยเพิ่มทั้งความแข็งแรง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรงและการทนความร้อน การที่มันแทบจะโปร่งใสแต่นำไฟฟ้าทำให้สามารถนำไปใช้กับจอสัมผัสหรือจอภาพที่พับงอได้ แต่การนำกราฟีนไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะถ้าจะทำในเชิงพาณิชย์ ก็ยังมีข้อจำกัดอีกมากที่ต้องแก้ไขได้ก่อน เช่น ราคาและศักยภาพการผลิต

2.3 ซิลเวอร์

เงิน (Silver) คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 47 และสัญลักษณ์คือ Ag มีโครงสร้างผลึกแบบ Cubic Face Centered และมีการจัดเรียงทางแม่เหล็กแบบ Diamagnetic เงินเป็นโลหะทรานซิชันและมีลักษณะสีขาวเป็นประกาย ซึ่งเงินมีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก ในธรรมชาติอาจรวมอยู่ในแร่อื่นๆ หรืออยู่อิสระ เงินใช้ประโยชน์ในการทำเหรียญ เครื่องประดับ และอุตสาหกรรมการถ่ายภาพ ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปและสมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทั่วไปของซิลเวอร์ [18]

สมบัติทั่วไป	
ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	เงิน, Ag, 47
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	11, 5, d
ลักษณะ	สีขาวเป็นประกาย
มวลอะตอม	107.8682 กรัม/โมล
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 1

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของซิลเวอร์ [18]

สมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	10.49 กรัม/ซม. ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	9.320 กรัม/ซม. ³
จุดหลอมเหลว	1234.93 K (961.78 °C)
จุดเดือด	2435 K (2162 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	11.28 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	258 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	25.350 J/(mol.K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ประโยชน์ของซิลเวอร์

มนุษย์เรารู้จักการใช้ประโยชน์จากโลหะเงิน (Silver) มานานแล้ว ในอดีตนิยมนำเงินมาทำเป็นภาชนะเก็บอาหารเพราะเชื่อกันว่า สามารถทำให้อาหารคงสภาพไม่เน่าเสียง่าย หรือการใส่เหรียญเงินไว้ในบ่อน้ำของชุมชนเพื่อทำให้เป็นน้ำสะอาดที่เก็บไว้ดื่มกินได้ตลอดทั้งปี ธาตุเงินเป็นธาตุที่มีสมบัติพิเศษและมนุษย์รู้จักเรียนรู้ที่จะใช้ประโยชน์จากความพิเศษของมัน ในปัจจุบันมีการพัฒนาโลหะเงินเพื่อไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆดังต่อไปนี้

- 1) ด้านเงินตราโดยนำเงินไปทำเหรียญเงินตราเหรียญกษาปณ์เพื่อแลกเปลี่ยนสินค้าและการลงทุนต่างๆ
- 2) ด้านเครื่องประดับ โดยโลหะเงินสามารถใช้ร่วมกับโลหะชนิดอื่น เพื่อประกอบเป็นเครื่องประดับอันสวยงาม เช่น ทองคำ ทองแดง เหล็ก ทองเหลือง นอกจากนี้ เครื่องเงินยังมีประโยชน์มากในด้านใช้สอย เช่น ช้อน ช้อน มีด เป็นต้น
- 3) ด้านทันตกรรม โดยใช้เงินผสมกับดีบุก และโลหะอื่นๆ เพื่อให้ได้ amalgams ที่ใช้สำหรับอุดฟัน การผสมผงของโลหะเงินเข้ากับโลหะอื่นนั้น จะช่วยให้ amalgams สามารถปรับตัวรับเข้ากับรูของฟันที่ต้องการอุดได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังจับตัวแข็งภายในเวลาไม่กี่นาที
- 4) ด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การถ่ายภาพและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ โดยการถ่ายภาพจะใช้เงินในรูปแบบของไลต์ในเตรทและสีเงิน อีกทั้งผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าบางชนิดก็มีโลหะเงินเป็นส่วนประกอบสำคัญ เช่น สายเคเบิล สายลำโพง นาฬิกาที่ยังใช้แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์ เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น
- 5) ด้านเลนส์และกระจก กระจกที่ต้องการการสะท้อนเหนือกว่าธรรมดา ส่วนใหญ่ทำมาจากเงิน ในขณะที่กระจกทั่วไปส่วนใหญ่ทำจากอะลูมิเนียม
- 6) ด้านอุตสาหกรรมและการพาณิชย์ โลหะเงินใช้สำหรับสร้างสิ่งที่มีคุณภาพสูง เช่น เครื่องดนตรีประเภทเป่าลมต่าง ๆ และเงินที่ใช้ในการทำอัลลอยด์บัดกรีและประสาน
- 7) ด้านการแพทย์ เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์การแพทย์ต่างๆ อาจถูกใช้เพื่อรักษาโรคติดเชื้อภายนอก เงินยังใช้ในการใช้งานทางการแพทย์บางอย่าง เช่น สายสวนปัสสาวะท่อช่วยหายใจ เป็นต้น
- 8) ด้านเสื้อผ้า เงินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราบนเสื้อผ้า เช่น ถุงเท้า เสื้อกีฬา เพื่อลดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์และความเสี่ยงของการติดเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่รวมอยู่ในเสื้อผ้าหรือรองเท้า โดยใช้นูภาคซิลเวอร์นาโนในพอลิเมอร์จากเส้นด้ายเคลือบด้วยเงิน [18]

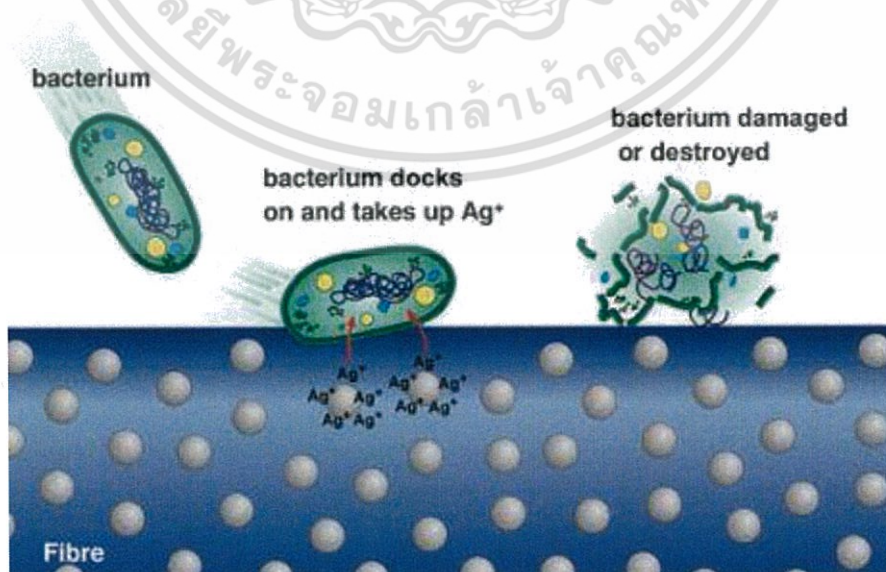
2.3.2 อนุภาคนาโนซิลเวอร์

ซิลเวอร์นาโน (Silver Nano) คือ เทคโนโลยีการสังเคราะห์เงินหรือซิลเวอร์ (Silver) ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (Nanometer) ซึ่งมีขนาดไม่เกิน 100 นาโนเมตร เทียบเท่ากับดีเอ็นเอในร่างกายของมนุษย์ และเนื่องจากขนาดที่เล็กนี้เอง ทำให้มีปริมาณพื้นที่ผิวสูงขึ้น ซึ่งสามารถสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น

2.3.2.1 กลไกการทำงานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์

อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดเล็กมากๆ สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้ และออกฤทธิ์ในการทำลายเซลล์ของแบคทีเรียได้โดยใช้ปริมาณโลหะเงินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ผลิตได้จากการใช้นาโนเทคโนโลยีมีขนาดอนุภาคประมาณ 25 นาโนเมตร หรือประมาณ 1 ใน 1,000 ของ ขนาดเซลล์ของแบคทีเรียและกลไกการทำงานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์คือ เมื่ออนุภาคนาโนซิลเวอร์สัมผัสกับผนังเซลล์จะสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียหรือเชื้อราได้ จากนั้นอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโนซึ่งมีสมบัติเป็น Soft acid จะเกิดอันตรรกิริยากับโมเลกุลที่เป็น Soft base ภายในเซลล์ ซึ่งก็คือส่วนที่เรียกว่า หมู่ซัลไฟดริล (Sulphydryl group) ของเอนไซม์โปรตีเนส (Proteinase) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับเมตาบอลิซึมของเซลล์ โดยหมู่ซัลไฟดริล (-SH) ที่มีอะตอมของซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบจะจับตัวกับอนุภาคของเงินทำให้กระบวนการทำงานของเอนไซม์หยุดการทำงานจนกระทั่งเซลล์ของแบคทีเรียหยุดการเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพไปในที่สุด ดังนั้น 3 กลไกหลักที่ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโนสามารถต่อต้านแบคทีเรียได้มีดังต่อไปนี้

- 1) อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในช่วง 1 – 10 nm สัมผัสกับผิวหน้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียและรบกวนการทำงานระดับเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น การขนส่งสารเข้าออกจากเซลล์และการหายใจ
- 2) อนุภาคนาโนซิลเวอร์เกิดการสลายตัวและปลดปล่อย Silver ion (Ag^+) เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก ซึ่งสามารถทำให้ปลดปล่อย Silver ion (Ag^+) ออกมาที่มีความเข้มข้นสูงและสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว
- 3) อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถแทรกเข้าไปสู่ภายในเซลล์ของแบคทีเรียและรบกวนการทำงานระดับโมเลกุล โดยจับกับสารที่มีกำมะถัน (S) และฟอสฟอรัส (P) ที่เป็นองค์ประกอบเช่น ดีเอ็นเอ



รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการทำงานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ต่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์

2.3.2.2.1 วิธีรีดักชันทางเคมี

1. วิธีนี้สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้วิธีรีดักชันทางเคมีซึ่งใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride) และ Poly (amide-amine) เป็นตัวรีดิวซ์ สามารถสังเคราะห์ได้โดยนำ 3 กรัม ของ Hyperbranched poly (amide-amine) ลงในขวดรูปชมพู่และเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และพร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเตรียมสารละลายซิลเวอร์ในเตรท 0.1 ในน้ำ 5 มิลลิลิตร และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.1 กรัม ในน้ำ 5 มิลลิลิตร และหยดสารละลายทั้งสองลงในสารละลายพอลิเมอร์พร้อมๆกัน พร้อมทั้งปั่นกวนและควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนสีของสารละลายจากสีใสเป็นสีเหลืองเข้มเป็นการแสดงให้เห็นการก่อตัวของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ [20]

2. วิธีนี้สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตเป็นตัวกลางและ กุลโคสเป็นตัวรีดิวซ์ วิธีนี้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้โดยการเตรียมโซเดียมอัลจิเนต 1 กรัม ใส่ลงในน้ำกลั่น 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมสารละลายซิลเวอร์ในเตรทที่มีความเข้มข้น 0.005 โมลต่อลิตร ลงไป 10 มิลลิลิตร และปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเติมสารละลายกุลโคส 40 มิลลิลิตร (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) และทำการปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง รักษาอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง [21]

2.3.2.2.2 วิธีไมเซลล์

วิธีไมเซลล์สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้โดยนำซิลเวอร์ในเตรทไปปั่นกวนกับสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต จากนั้นหยดสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เตรียมใหม่ลงในสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่มีไอออนอยู่ อัตราส่วนโมลของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่อซิลเวอร์ในเตรทจะคงที่ 1 เสมอ สีของสารละลายจะเปลี่ยนทันทีจากสีขาวขุ่นเป็นสีน้ำตาลเข้มแสดงให้เห็นผลของการรีดักชันของซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ไปเป็นซิลเวอร์ (Ag^0) และเกิดการก่อตัวของสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ สารละลายผสมจะถูกปั่นกวนในที่มืดเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเข้าสู่เครื่องหมุนเหวี่ยงด้วย 1000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที ทำการจัดเก็บสารละลายสีเหลืองใส [22]

2.3.2.2.3 วิธี Solid state

ขั้นแรก นำแป้งที่แห้ง 1 กรัม บดผสมเข้ากับโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ด 0.25 กรัม ในครกบดขนาดเล็ก จากนั้นให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ขั้นที่สองละลายซิลเวอร์ในเตรทกับน้ำ 2 มิลลิลิตร ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 3 มิลลิลิตร เพื่อลดปริมาณของน้ำและง่ายต่อการระเหยออกในระหว่างการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ละลาย ซิลเวอร์ในเตรทถูกหยดผสมลงในแป้งต่างในขณะที่ปั่นกวนโดยใช้หลอดหยด จากนั้นนำของผสมไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที สีของสารผสมจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลเหลืองในตอนสิ้นสุดปฏิกิริยา เป็นการยืนยันการก่อตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโน [23]

2.3.2.2.4 วิธี Solvothermal

สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มี 100 มิลลิลิตร ของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นเติมเอทานอล 50 มิลลิลิตร ต่อ คอนเดนเซอร์เข้ากับรูปชมพู่ซึ่งจะไม่ทำให้ไอของตัวทำละลายออกไปข้างนอกและจะถูกควบแน่นทันที เพื่อรักษาความคงที่ของปริมาณในระบบระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ ด้วยวิธี Solvothermal สามารถสังเคราะห์เงินที่แยกออกมาได้อย่างสมบูรณ์แบบเพราะหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนจากอากาศ การทำปฏิกิริยาของสารละลายผสมจะถูกปั่นกวนบนเครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก พร้อมทั้งทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 40 ชั่วโมง ในระหว่างการทำปฏิกิริยาให้อุณหภูมิอยู่สูงสุดประมาณ 80 องศาเซลเซียส [24]

จากวิธีการข้างต้นที่ได้กล่าวไป แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้จากหลายวิธี แต่บางวิธีได้ใช้สารเคมีที่เป็นพิษและอันตรายสูง และบางวิธีก็ใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งบางวิธีก็ใช้เวลาในการสังเคราะห์นาโนซิลเวอร์นานเกินวิธีต่อไปนี้จะเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ใช้เวลาในการสังเคราะห์นาโนซิลเวอร์ไม่นาน โดยสามารถใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ซึ่งได้แก่วิธีดังต่อไปนี้

2.3.2.2.5 วิธีรีดักชันด้วยไมโครเวฟ

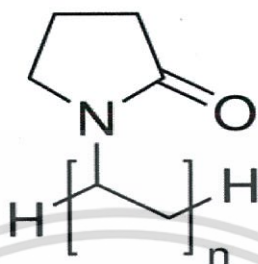
วิธีรีดักชันด้วยไมโครเวฟสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยนำซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ไปชั่งประมาณ 0.3 กรัม และนำพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ไปชั่งประมาณ 0.3 กรัม อัตราส่วนที่เราใช้ในการสังเคราะห์นาโนซิลเวอร์คือ 1:1 จากนั้นนำซิลเวอร์ไปละลายในน้ำ 10 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวน ส่วนพอลิไวนิลไพโรลิโดนละลายในน้ำ 15 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวน นำสารทั้งสองชนิดมาปั่นกวนพร้อมกันเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารเทใส่ภาชนะเพื่อนำเข้าสู่ตู้ไมโครเวฟ ทำปฏิกิริยาด้วยการให้เวลาที่ต่างกัน 20 40 60 และ 90 วินาที โดยหยุดทุกๆ 20 วินาที อุณหภูมิตัวอย่างถูกควบคุมอยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเดือดอย่างรุนแรงและไปถึงการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ หลังจากฉายรังสีไมโครเวฟสารผสมถูกปล่อยให้เย็นในอุณหภูมิห้อง [25] อุณหภูมิของตู้อบไมโครเวฟสามารถสูงถึง 60 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 20 นาที แต่สำหรับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ที่มีความเข้มข้นและกรรมวิธีที่คล้ายกันของซิลเวอร์ไนเตรทและพอลิไวนิล ไพโรลิโดนในน้ำถูกให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปถึง 60 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลาประมาณ 20 นาที สิ่งที่ทำให้เห็นว่าเมื่อปริมาณพลังงานที่ใกล้เคียงกับตู้ไมโครเวฟ การให้ความร้อนแบบดั้งเดิมจะได้อัตราความร้อนที่ช้ากว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.8

2.4 พอลิไวนิลไพโรลิโดน

พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP) เป็นสารกลุ่มพอลิเมอร์ที่สามารถละลายในน้ำและตัวทำละลายได้ ตัวอย่างเช่น ละลายแอลกอฮอล์ เป็นต้น พอลิไวนิลไพโรลิโดนมีลักษณะเป็นผงสีขาวถึงเหลืองอ่อน มีสูตรเคมีคือ $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$ และมีขนาดมวลโมเลกุลอยู่ที่ประมาณ 2.5 กรัมต่อโมล⁻¹ ส่วนโครงสร้างภายในของพอลิไวนิลไพโรลิโดนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์ (Amide) และพอลิไวนิลไพโรลิโดนมีคุณสมบัติทั้งชอบน้ำและไม่ชอบน้ำในโมเลกุลเดียวกัน ซึ่งพอลิไวนิลไพโรลิโดนสามารถนำไปใช้อย่างหลากหลาย สิ่งที่น่าสนใจคือสามารถใช้ในทางการแพทย์อย่างกว้างขวาง

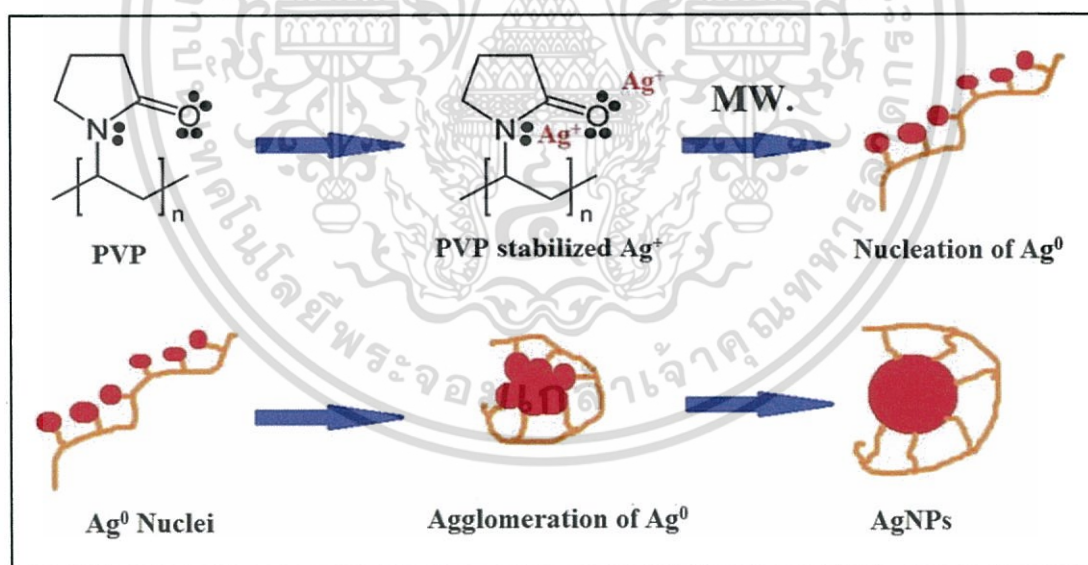
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ในการขยายปริมาตรของพลาสมาและถูกใช้เป็นตัวประสานในยาเม็ดจำนวนมาก เป็นต้น พอลิไวนิลไพโรลิโดนมีความเป็นพิษต่ำมากและสามารถทำเป็นวัสดุเคลือบสีสำหรับงานพิมพ์อิงค์เจ็ท และยังสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการดูแลความสะอาดของร่างกาย เช่น แชมพู ยาสีฟัน เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นตัวรักษาเสถียรภาพในการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนอีกด้วย โครงสร้างของพอลิไวนิลไพโรลิโดนมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของพอลิไวนิลไพโรลิโดน [26]

ซึ่งในการทดลองมีการนำพอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP) มาใช้ในวิธีรีดักชันด้วยไมโครเวฟ โดยพอลิไวนิลไพโรลิโดนนั้นเป็นตัวรักษาเสถียรภาพและอีกทั้งยังเป็นตัวช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์อีกด้วย



รูปที่ 2.8 แสดงกลไกที่เป็นไปได้ของการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ เป็นตัวรักษาเสถียรภาพและตัวรีดักแทนซีในการทำปฏิกิริยาโดยใช้วิธีรีดักชันด้วยไมโครเวฟ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เชื้อแบคทีเรีย

เชื้อแบคทีเรียเป็นประเภทของสิ่งมีชีวิตประเภทใหญ่ ซึ่งมีขนาดเล็ก มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ส่วนใหญ่มีเซลล์เดียวและมีโครงสร้างเซลล์ที่ไม่ซับซ้อนมาก โดยทั่วไปสามารถแบ่งแบคทีเรียได้หลายรูปแบบ เช่น แบ่งตามรูปร่าง แบ่งตามการย้อมแบบติดสีแกรม แบ่งตามต้องการใช้ออกซิเจน เป็นต้น

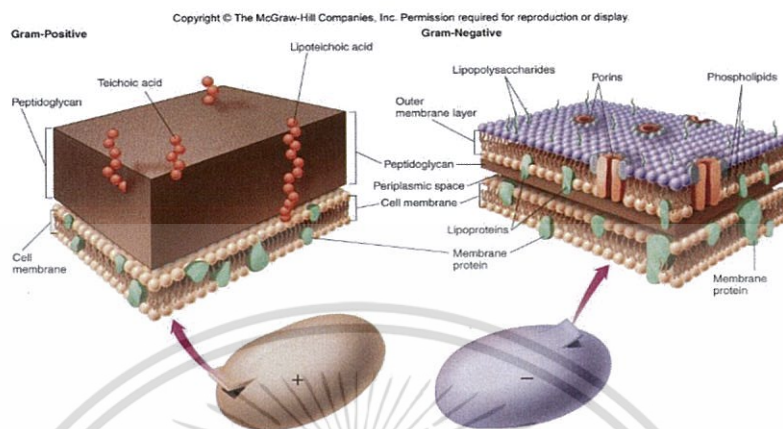
2.5.1 ผนังเซลล์

ผนังเซลล์ (Cell wall) เป็นส่วนทำให้เซลล์คงรูปร่างอยู่ได้และเป็นส่วนที่แข็งแรง ในแต่ละกลุ่มแบคทีเรียจะมีส่วนประกอบของผนังเซลล์แตกต่างกันออกไป ส่วนประกอบที่สำคัญของชั้นผนังเซลล์คือชั้น Peptidoglycan ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ N-acetyl glucosamine ที่เป็นองค์ประกอบของ Chitin โดยชั้น Peptidoglycan เป็นส่วนที่ถูกทำลายได้ง่ายโดยสารปฏิชีวนะบางชนิด เช่น Penicillin และ Cephalosporin เป็นต้น รวมทั้งถูกทำลายด้วยสาร Disinfectants และ Detergent เอนไซม์ Lysozyme ก็ยังสามารถทำลาย Peptidoglycan ได้ ซึ่งความแตกต่างของโครงสร้างผนังเซลล์มีการแยกโดยใช้วิธี Gram stain ซึ่งเป็นการย้อมสีแบคทีเรียที่บอกความแตกต่างของโครงสร้างผนังเซลล์ได้ดี โดยการย้อมสีวิธีนี้จะแยกแบคทีเรียออกเป็น 2 กลุ่ม ตามปฏิกิริยาการติดสีของแบคทีเรีย ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวก เซลล์ติดสีม่วงของ Crystal violet ซึ่งเป็นสีย้อมแรก (Primary stain) ส่วนแบคทีเรียแกรมลบ เซลล์ติดสีแดงของ Safranin O ซึ่งเป็นสีย้อมที่สองหรือสีย้อมทับ (Secondary stain หรือ Counterstain) ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกมีลักษณะ 1 ชั้นเซลล์และมีความหนาของชั้นเซลล์ประมาณ 25-30 มิลลิไมโครเมตร ซึ่งองค์ประกอบเป็นหลักถึงร้อยละ 90 คือ Peptidoglycan และยังมี Teichoic acid และ Lipoteichoic acid ยึดติดกับชั้น Peptidoglycan ไม่พบชั้น Outer membrane ส่วนผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบมีลักษณะ 2 ชั้นเซลล์และมีความหนาประมาณ 15-20 มิลลิไมโครเมตร โดยมี Outer membrane ล้อมรอบ Peptidoglycan ที่บางไว้ ซึ่งไม่พบ Teichoic acid และ Lipoteichoic acid ส่วน Outer membrane มีหน้าที่เป็นเครื่องกั้นเอนไซม์ที่จำเป็นต่อการเจริญของเซลล์ไม่ให้ไหลออกจากช่องว่าง Periplasm และสามารถกั้นสารเคมีหรือเอนไซม์จากภายนอกไม่ให้เข้าไปทำลายภายในเซลล์ ดังนั้นผนังแบคทีเรียแกรมบวกจึงถูกทำลายด้วย Lysozyme ได้ง่ายกว่าแบคทีเรียแกรมลบ ซึ่งผนังเซลล์ยังทำหน้าที่เป็นตัวค้ำจุนโครงสร้างปกป้องเซลล์ คัดกรองสาร และยังมีหน้าที่ป้องกันการขยายตัวมากเกินไปหากน้ำไหลผ่านเข้าสู่ภายในเซลล์ นอกจากนี้ยังพบว่า Porin protein ในแบคทีเรียแกรมลบและสามารถป้องกันสารที่เป็นอันตรายไม่ให้ผ่านเข้าสู่เซลล์ [28]

2.5.2 เยื่อหุ้มเซลล์

เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) เป็นเยื่อหุ้มที่อยู่ติดกับผนังเซลล์ อาจจะมีลักษณะเรียบ (Smooth) หรืออาจจะพับไปมา เพื่อขยายขนาด เยื่อหุ้มเซลล์มีหน้าที่ควบคุมการเข้า-ออกของแร่ธาตุ น้ำ สารอาหาร และไอออนโลหะต่างๆ จากภายนอกเข้าสู่ภายใน และจากภายในออกสู่ภายนอก แต่เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

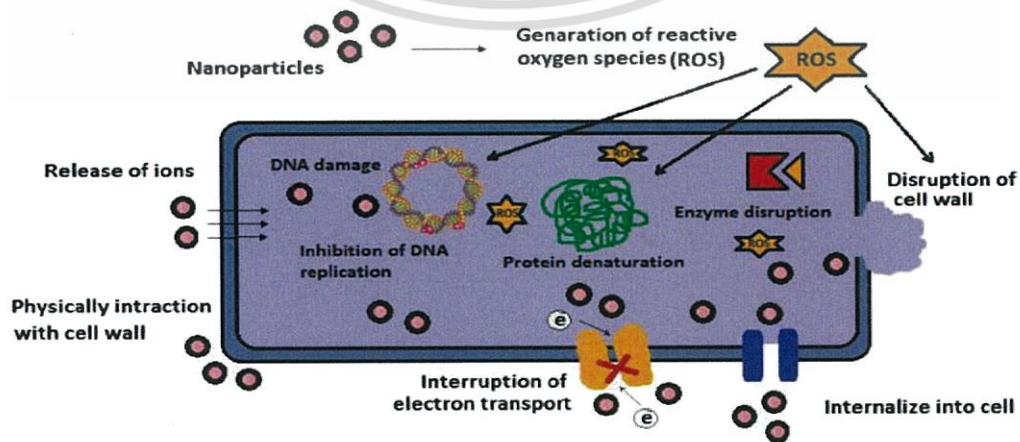
เป็น Selective permeable และพบว่าเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียเป็นบริเวณสำคัญในการเกิดกระบวนการเมแทบอลิซึม ซึ่งมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ การย่อยสลายสารอาหาร การสร้างพลังงาน และรวมถึงกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เกิดบริเวณนี้



รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก (ซ้าย) และแบคทีเรียแกรมลบ (ขวา) [29]

2.6 กลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์/โลหะนาโนคอมโพสิต

ซึ่งโลหะนาโนในพอลิเมอร์ถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน ที่มีส่วนผสมของเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียทำให้เกิดปฏิกิริยากับโปรตีน ซึ่งทำให้โลหะนาโนแตกตัวเป็นไอออน กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของโลหะนาโนกับโปรตีน ได้เป็นไอออนของโลหะ ต่อจากนั้นไอออนของโลหะแพร่ผ่านไปสู่อินทรีย์ของเซลล์แบคทีเรียทำให้การทำงานของไมโทคอนเดรียผิดปกติหรือเซลล์ถูกทำลาย ซึ่งก่อให้เกิดสารอนุมูลอิสระชนิด ROS ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อระบบการหายใจของเซลล์และการสร้างพลังงานเอทีพี (ATP) ซึ่งนำไปสู่การทำลายโปรตีน และดีเอ็นเอ (DNA) ภายในเซลล์ ทำให้แบคทีเรียถูกทำลายและเสื่อมสภาพในที่สุด [30]



รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์/โลหะนาโนคอมโพสิต [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.C. Stanier และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาผลของการเสริมแรงของแผ่นนาโนกราฟีนออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยึดตัวของยางธรรมชาติ โดยสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมนั้นได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมแรงจากสารตัวเติม โดยผลที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดได้อัตราค่าความเครียดที่แตกต่างกันถึง 600 เปอร์เซ็นต์ และผลของค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากการเติมสารตัวเติมลงไปแม้ในปริมาณเล็กน้อย จากผลนี้สามารถยืนยันได้ถึงการเกิดแรงอันตรกิริยาที่ีระหว่างผิวหน้าระหว่างแผ่นนาโนกราฟีนออกไซด์กับยางธรรมชาติ ส่วนสมบัติในการยึดตัวของวัสดุยังศึกษาจากการทดสอบการดึงยึดและคืนตัวของวัสดุ จากการเติมและไม่เติมแผ่นนาโนกราฟีน ซึ่งทำให้มีผลต่อค่าความเครียดที่แตกต่างกัน โดยพบว่าค่า Young's modulus เพิ่มขึ้นผันตรงกับอัตราความเครียดและการกระจายตัวที่ดีของการเติมกราฟีนออกไซด์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานเป็นผลเนื่องมาจากอัตราการเติมปริมาณกราฟีนออกไซด์ในปริมาณมาก

Wang Xing และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาสมบัติในด้านต่างๆ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นของวัสดุผสมระหว่างกราฟีนออกไซด์กับน้ำยางธรรมชาติโดยใช้วิธีการพัฒนาน้ำยาง โดยทำการเตรียมวัสดุผสมระหว่างแผ่นนาโนกราฟีนกับยางสไตรีนบิวทีไดอีนจากการนำแผ่นกราฟีนเป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) ไปกระจายตัวในวัฏภาคเนื้อหลัก (Matrix phase) ของยาง ซึ่งจากข้อมูลของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าแผ่นกราฟีนไปกระจายตัวได้อย่างดีในยางสไตรีนบิวทีไดอีน ส่วนสมบัติเชิงกลมีการเพิ่มขึ้นอย่างดีเยี่ยมโดยพบว่าแผ่นกราฟีนมีอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวหน้าที่ดีกับกับสไตรีนบิวทีไดอีน โดยจากผลที่วัดได้ของค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเกือบ 11 เท่า เมื่อเทียบกับกราฟีน 7 phr ซึ่งเปรียบเทียบกับเท่ากับการเสริมแรงโดยเติมเขม่าดำ (Carbon black) 30 phr และเทียบเท่ากับการเติมนาโนซิลิกา 40 phr นอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่นๆในงานวิจัยที่น่าสนใจคือ สมบัติการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส สมบัติทนการสึกกร่อน สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติความเสถียรทางความร้อน ซึ่งจากสมบัติเหล่านี้ของวัสดุผสมแผ่นนาโนกราฟีนกับยางสไตรีนบิวทีไดอีน จึงสามารถนำวัสดุผสมนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย

Ning Yan และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมยางธรรมชาติกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากการผสมน้ำยาง และการตกตะกอนร่วม ร่วมกับกระบวนการอัดร้อนและเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง จากการควบคุมสารช่วยกระจายตัวที่ดีจึงได้วัสดุผสมที่แสดงโครงสร้างสามมิติของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์หรือแสดงสมบัติถึงการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แบบเดี่ยว การกระจายตัวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ส่งผลต่อการเชื่อมโยงโครงสร้างในทางเคมี และมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการขวางกั้น จากการตรวจสอบโดย Small angle X-ray scattering (SAXS) และเครื่องมือวิเคราะห์ Solid-State ^{13}C NMR แสดงให้เห็นว่าแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ส่งผลต่อกระบวนการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติและการเชื่อมโยงของซัลเฟอร์พอลิซัลไฟดิกที่อยู่ในยางธรรมชาติในตอนแรกได้ลดลง เมื่อปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของรีดิวซ์กราฟีนสูงกว่า 6 phr การเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบโมโนซัลไฟดิก ทำให้การเชื่อมโยงขวางมีความหนาแน่นขึ้น อย่างไรก็ตามวัสดุผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ แสดงให้เห็นทั้งการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เนื่องจากแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์การกระจายตัวที่ดีในวัสดุผสม ผลการทดลองยืนยันว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารตัวเติมนั้นมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการกำหนดสมบัติของแผ่นยางธรรมชาติผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Srinivasarao Yaragalla และคณะ [34] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ทางเคมีของวัสดุผสมยางธรรมชาติกับกราฟีนออกไซด์ ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางโครงสร้าง โดยการนำรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการทางความร้อน (TRG) ผสมเข้ากับยางธรรมชาติ (NR) ด้วยวิธีการหลอมผสมเชิงกล ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมากในระดับอุตสาหกรรม โดยการเติม TRG ในปริมาณน้อย (3 %w/w) เพื่อปรับปรุงสมบัติในด้านความแข็งแรง (282%) สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไดออกไซด์ (O_2) (175%) ให้เหมาะสมกับยางธรรมชาติ จากข้อมูลทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสม NR-TRG ในสมบัติทางกายภาพ แสดงให้เห็นถึงสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซได้อย่างดี ส่วนการกระจายตัวของ TRG ในวัฏภาคของยางธรรมชาติ และปฏิกิริยาเคมีระหว่าง NR และ TRG จะตรวจสอบทางชั้นสูงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) การกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงอินฟราเรด (FT-IR), การกระเจิงแสงของปรากฏการณ์ของรามาน (Raman) และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray) โดยการเติม TRG ลงใน NR จะสิ้นสุดการเติมที่ 3 %w/w TRG ซึ่งเป็นสัดส่วนของตัวอย่างวัสดุนาโนผสมที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วน (0.5 %w/w, 2 %w/w) ในสมบัติด้านความแข็งแรงและการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซ ส่วนสมบัติทางกายภาพดีขึ้นในทางสัณฐานวิทยาเป็นผลเนื่องจากวัสดุนาโนผสมมีการเชื่อมขวางกันอย่างหนาแน่น (Crosslinking) โดยขอบเขตในการเติม TRG ในวัฏภาคของ NR จะเป็นไปตามทฤษฎีของ Kraus และสมการของ Mooney-Rivlin ซึ่งจากการเปรียบเทียบการเติมกราฟไฟต์ กราไฟต์ออกไซด์ และ TRG ในวัสดุผสมนาโนยางธรรมชาติ พบว่ามีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านสัมพันธ์กับรูปแบบการซึมผ่านของ Neilson และ Bharadwaj

Dan li และคณะ [35] ได้ทำการศึกษากระบวนการในการกระจายตัวในสารละลายของแผ่นนาโนกราฟีน โดยมีความจำเป็นที่จะหาความเหมาะสมที่สุดในการนำกราฟีนไปใช้งานที่เป็นประโยชน์และหลากหลาย กราไฟต์และแผ่นกราฟีนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำให้กระจายตัวในสารละลายโดยปราศจากการใช้สารช่วยกระจายตัวได้รับความน่าสนใจและมีความท้าทายในการศึกษาหาวิธีนั้นๆ ในรายงานวิจัยนี้จึงได้ทำการแปลงกราฟีนที่ได้มาจากกราฟไฟต์ เพื่อที่จะได้เป็นสารคอลลอยด์ที่มีความเสถียรในสารละลายโดยวิธีการทางเคมี และจากการข้อดีของกระจายตัวของกราฟีนในสารละลายโดยไม่มีพอลิเมอร์หรือสารลดแรงตึงผิวเป็นตัวช่วยกระจายตัวนั้น ทำให้การงานวิจัยนี้เป็นที่สนใจและมีความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการกระจายตัวของวัสดุกราฟีนนี้ เนื่องจากใช้กระบวนการเทคนิคที่มีราคาถูก ผลิตง่าย และได้ปริมาณมาก อีกทั้งยังเป็นการเปิดโอกาสในการใช้โครงสร้างระดับนาโนคาร์บอนเพื่อการใช้งานที่หลากหลายและกว้างขวางมากขึ้นต่อไปในอนาคต

Monir Noroozi และคณะ [25] ได้ศึกษาการสร้างอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีโครงสร้างเป็นทรงกลมและรูปร่างกึ่งไม้ได้อย่างรวดเร็วและไม่เป็นพิษ โดยการฉายรังสีไมโครเวฟ ซึ่งปราศจากการใช้ตัวรีดิวซ์อื่นๆ โดยทดสอบเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีไมโครเวฟ การสร้างอนุภาคนาโนซิลเวอร์สร้างได้โดยการรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนในน้ำที่เป็นกลาง และใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ และจะนำมาเปรียบเทียบกับสารสังเคราะห์โดยวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม การวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis spectrometry) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การวัดค่าการดูดกลืนแสงของอะตอม (AAS) และการวัดขนาดของอนุภาคโดยการกระเจิงแสง (PCS) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการฉายรังสี ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคดีขึ้น และขนาดอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย รวมถึงซิลเวอร์อนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่จะหายไปจากความเข้มข้นสูง และการโตของโครงสร้างอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปรากฏขึ้นเป็นรูปกิ่งไม้

W.G.I.U Rathnayake และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์และตรวจสอบเอกลักษณ์ของนาโนซิลเวอร์ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยการเติมลงไปผสมกับน้ำยางธรรมชาติ ทำการขึ้นรูปในลักษณะเป็นก้อนยาง ซึ่งในการสังเคราะห์นาโนซิลเวอร์นั้นทำได้โดยการใช้ซิลเวอร์ไนเตรทและไตรโซเดียมซิเตรทเป็นตัวควบคุมเสถียรภาพในสารละลายมาตรฐาน จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและวิเคราะห์สัญญาณวิทยาโดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ซึ่งพบว่าสารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์มีการกระจายตัวในของเหลวในระดับนาโนที่เสถียร และเมื่อนำอนุภาคนาโนซิลเวอร์ผสมลงไปในน้ำยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียสองชนิดโดยแกรมบวกคือ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบคือ *Escherichia coli* (*E. coli*) อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการต่อต้านเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* (*A.niger*) ซึ่งดูได้จากรัศมีของบริเวณการยับยั้งของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบที่เพิ่มขึ้น

Hongshui Wang และคณะ [36] ได้ทำการศึกษากลไกของพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ในการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี โดยใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ดีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ซึ่งกระบวนการเตรียมปฏิกิริยาของพอลิไวนิลไพโรลิโดนได้อธิบายถึงลักษณะของปฏิกิริยาที่สังเกตได้ โดยใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างซิลเวอร์ไอออนกับกลูโคสเนื่องจากพอลิไวนิลไพโรลิโดนมีไฮโดรเจนที่เสถียร พอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ผสมกับ ซิลเวอร์จะช่วยป้องกันการเติบโตขนาดของอนุภาคและการจับกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคซิลเวอร์ได้ โดยอนุภาคซิลเวอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสั้นกว่า 50 นาโนเมตร ไนโตรเจนในพอลิไวนิลไพโรลิโดนจะประสานเข้ากับซิลเวอร์ ส่วนอนุภาคซิลเวอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 500-1000 นาโนเมตร ทั้งไนโตรเจนและออกซิเจนจะประสานเข้ากับซิลเวอร์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) ผงกราไฟต์ (Graphite powder, มวลโมเลกุล 12.01 กรัมต่อโมล) ผลิตโดย SIGMA-ALDRICH
- 2) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium Permanganate; KMnO_4) ผลิตโดย CARLO ERBA
- 3) กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid; H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก ผลิตโดย QReD
- 4) โซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate; NaNO_3)
- 5) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ผลิตโดย CARLO ERBA
- 6) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ผลิตโดย SIGMA-ALDRICH
- 7) ไฮไดรราซีนไฮเดรต (Hydrazine hydrate; N_2H_4) มวลโมเลกุล 32.05 กรัมต่อโมล ความเข้มข้น 50-60 เปอร์เซ็นต์ผลิตโดย SIGMA-ALDRICH
- 8) ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate; AgNO_3) ผลิตโดย Merck-chemicals, Analysis
- 9) พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP มวลโมเลกุลเฉลี่ย 40,000) ผลิตโดย SIGMA-ALDRICH
- 10) น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex; NRL) ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักต่อ น้ำหนักชนิด High ammonia
- 11) สารละลายแอมโมเนีย (Ammonia solution; NH_4OH) เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ผลิตโดย CARLO ERBA
- 12) เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ มวลโมเลกุล 46.07 กรัมต่อโมล) ผลิตโดย DUKSAN PURE CHAMICALS

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องแก้วต่างๆ บริษัท DURAN Group GmbH
- 2) แท่งแม่เหล็กปั่นกวนสาร (Magnetic bar)
- 3) กระจกนํ้ากลั่น (Distilled Water)
- 4) ช้อนตักสาร (Spatula)
- 5) ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ขนาด 10-100 ไมโครลิตร และขนาด 100-1000 ไมโครลิตร
- 6) ขวดแก้วเล็ก (Vial)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) กระดาษกรอง (Filter paper) Whatman No.42 บริษัท Whatman International Ltd
- 8) ตู้ดูดควัน (Fume Hood) FM5-03 Flexlab, Nakorn Pathom ประเทศ Thailand
- 9) ตู้อบลมร้อน (Oven) Serial no.8 502.0552 บริษัท MEMMERT ประเทศ Germany
- 10) เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง GR-200 บริษัท A&D Company
- 11) เครื่องกวนสารแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 12) เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven) ผลิตโดย SAMSUNG รุ่น MG23F301EAS
- 13) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) X' Pert MPD, Phillips ประเทศ Netherland
- 14) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared; FT-IR) Nicolet iS50, Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศ USA
- 15) เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer) Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศ USA
- 16) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) JEOL-JSM5800LV ประเทศ Japan
- 17) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) TM-2010 TEOL, ประเทศ Japan
- 18) อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) Oxford ISIS 300 ประเทศ England
- 19) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) Evolution 201 Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศ USA
- 20) เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Gravity Analysis; TGA) Mettler Toledo ประเทศ USA
- 21) เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) LLOYD LR 5K

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์ และแผ่นยางธรรมชาติผสม ดังต่อไปนี้

3.3.1 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากผงกราฟไฟต์

3.3.1.1 การเตรียมกราฟไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการดัดแปลงวิธีของฮัมเมอร์

- 1) ชั่งผงกราฟไฟต์ 2 กรัม และโซเดียมไนเตรท (NaNO_3) 1 กรัม
- 2) เทลงในขวดก้นกลม แล้วนำขวดก้นกลมไปวางไว้บนถังน้ำแข็งที่มีการโรยเกลือพร้อมกับทำการปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc.H₂SO₄) 46 มิลลิลิตร พร้อมกับทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที ภายใต้การหล่อเย็นในถังน้ำแข็ง
- 4) ค่อยๆ เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO₄) 6 กรัม ลงในขวดก้นกลมที่ละนิด พร้อมกับทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที สารละลายเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีดำเขียว
- 5) นำขวดก้นกลมไปวางไว้ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิห้อง พร้อมกับทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที สารแขวนลอยจะเปลี่ยนจากสีดำเขียวเป็นสีน้ำตาล
- 6) นำขวดก้นกลมออกจากอ่างน้ำร้อน แล้วนำไปวางไว้บนถังน้ำแข็งอีกครั้ง
- 7) เติมน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำร้อน
- 8) เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนเพื่อจะหยุดปฏิกิริยา
- 9) ค่อยๆ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) 10 มิลลิลิตร พร้อมกับทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที สารแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง
- 10) เติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5% โดยปริมาตร พร้อมปั่นกวน
- 11) ทำการกรองตะกอนแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง
- 12) นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 13) นำตะกอนที่อบแห้งแล้วมาทำการบดละเอียด จากนั้นก็จะได้เป็นผงกราฟต์ออกไซด์ออกมา (จะได้ลักษณะเป็นผงสีดำ)

3.3.1.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง

- 1) ชั่งผงกราฟต์ออกไซด์ 320 มิลลิกรัม จากนั้นเทลงไปในหลอดเซนทริฟิวส์ เติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร
- 2) นำไปวางไว้ในตู้อัลตราโซนิคทำการโซนิเคทเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยใช้ น้ำแข็ง ในการหล่อเย็น
- 3) นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อแยกผงกราฟต์ออกไซด์ที่เหลืออกอยู่อกจากสารละลาย ใช้ 3000 รอบ 5 นาที
- 4) รินสารละลายออกจากหลอดเซนทริฟิวส์ก็จะได้สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ซึ่งมีสีน้ำตาล เข้มความเข้มข้น มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

3.3.1.3 การรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการรีดักชันทางเคมี

- 1) ทำการต้มน้ำให้มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โดยใช้บีกเกอร์ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- 2) นำกราฟีนออกไซด์ 6.00 มิลลิกรัม ใส่ขวดแก้วเล็กขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 12.00 มิลลิลิตร
- 3) นำไฮดราซีนไฮเดรต 0.01 โมลลิตรเติมลงในขวดแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) นำแอมโมเนีย 0.30 มิลลิลิตร เติมลงในขวดแก้ว แล้วใส่แท่งแม่เหล็กขนาดเล็กลงในขวดแก้ว
- 5) นำขวดแก้วที่มีสารละลายของกราฟีนออกไซด์อยู่ ปิดด้วยฝาเจาะรูไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พร้อมปั่นกวน
- 6) เมื่อครบ 20 นาที จึงนำขึ้นมาจากบีกเกอร์ และทิ้งไว้จนเย็นตัว จะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีดำดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

3.3.2 การเตรียมสารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์

ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Monir Noroozi และคณะ [25] ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกทั้งยังสังเคราะห์ได้สะดวกและรวดเร็ว ซึ่งในงานวิจัยสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้วิธีดักจับด้วยตู้ไมโครเวฟ และมีพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เป็นตัวรักษาเสถียรภาพ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ชั่ง PVP 0.3000 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นอีก 15.00 มิลลิลิตร คนให้ละลายน้ำเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) ชั่งซิลเวอร์ไนเตรท 0.3000 กรัม ใส่ลงไปบีกเกอร์พร้อมกับเติมน้ำกลั่น 10.00 มิลลิลิตร คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) ใส่ซิลเวอร์ที่คนเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย PVP อยู่ มีปริมาตรรวมเท่ากับ 25.00 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลายที่ใสไม่มีสี
- 4) ทำการรีดิวซ์ซิลเวอร์ด้วยเครื่องไมโครเวฟ โดยให้ความร้อนเป็นเวลา 180 วินาทีและใช้พลังงานความร้อน 300 วัตต์ ซึ่งจะทำให้การนำออกจากเครื่องไมโครเวฟทุกๆ 10 วินาที เพื่อปล่อยให้ภูมิลดลง
- 5) เติมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 0.03 มิลลิลิตรต่อสารแขวนลอยซิลเวอร์ 1.00 มิลลิลิตร เพื่อลดสภาพความเป็นกรดและรักษาเสถียรภาพของซิลเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสม

3.3.3.1 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติ

- 1) นำน้ำยางธรรมชาติใส่ลงกระบอกตวง 7 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์
- 2) นำน้ำกลั่นใส่กระบอกตวง 8 มิลลิลิตร เทลงบีกเกอร์ที่มีน้ำยางธรรมชาติอยู่
- 3) ปั่นกวนเป็นเวลา 8 นาที
- 4) เทลงในแม่แบบพิมพ์พลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 6 x 9.5 เซนติเมตร และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 12 ชั่วโมง
- 5) แกะออกจากแม่แบบจะได้แผ่นยางธรรมชาติที่มีความหนาเฉลี่ย 0.56 มิลลิเมตร

3.3.3.2 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น

- 1) เตรียมน้ำยางธรรมชาติ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และน้ำกลั่นตามเงื่อนไขที่กำหนดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงแสดงเงื่อนไขในการขึ้นรูปแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

ปริมาตรน้ำยาง (mL)	ปริมาตรน้ำกลั่น (mL)	ปริมาตร rGO (mL)	ปริมาณ rGO (wt.%)
7.00	6.00	2.00	0.10
7.00	6.00	4.00	0.19
7.00	6.00	6.00	0.28

หมายเหตุ : รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความเข้มข้น 1.8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

- 2) ผสมและปั่นกวนเป็นเวลา 8 นาที เทลงในแม่แบบพิมพ์พลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 6 x 9.5 เซนติเมตร และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 12 ชั่วโมง
- 3) เมื่อแผ่นยางผสมแห้งแล้วแกะออกจากแม่แบบจะได้แผ่นยางธรรมชาติที่มีความหนาเฉลี่ย 0.56 มิลลิเมตร

3.3.3.3 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ อนุภาคนาโนซิลเวอร์และยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น

- 1) เตรียมน้ำยางธรรมชาติ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ อนุภาคนาโนซิลเวอร์ และน้ำกลั่นตามเงื่อนไขที่กำหนดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการขึ้นรูปแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ

ปริมาตรน้ำ ยาง (mL)	ปริมาตรน้ำ กลั่น (mL)	ปริมาตร rGO (mL)	ปริมาณ rGO (wt.%)	ปริมาตร AgNPs (mL)	ปริมาณ AgNPs (wt.%)
7.00	1.90	6.00	0.28	0.10	0.01
7.00	1.75	6.00	0.28	0.25	0.03
7.00	1.50	6.00	0.28	0.50	0.05
7.00	1.00	6.00	0.28	1.00	0.11

หมายเหตุ : อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีความเข้มข้น 3.9 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

- 2) ผสมและปั่นจนเป็นเวลา 8 นาที เทลงในแม่แบบพิมพ์พลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 6 x 9.5 เซนติเมตร และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 12 ชั่วโมง
- 3) เมื่อแผ่นยางผสมแห้งแล้วแกะออกจากแม่แบบจะได้แผ่นยางธรรมชาติที่มีความหนาเฉลี่ย 0.56 มิลลิเมตร

3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

3.4.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultraviolet (UV) และ Visible (Vis) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน สารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่าสเปกตรัม (Spectrum) โดยตัวอย่างกราฟีนออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่นำไปวิเคราะห์ จะทำการเจือจางให้มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 0.5-1.0 แล้วบรรจุลงใน Cuvette และนำเข้าเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยวัดในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร เพื่อศึกษาสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงของกราฟีนออกไซด์เมื่อรีดิวซ์ด้วยไฮดราซีนและสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ถูกรีดิวซ์ด้วยพลังงานความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy; FT-IR)

เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ ตรวจสอบโครงสร้างของสารโดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วง Infrared (IR) ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารได้ จึงนำเทคนิคดังกล่าวนี้มาใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนไปของกราฟีนออกไซด์เมื่อทำการรีดิวซ์ด้วยไฮดราซีน อนุภาคนาโนซิลเวอร์ และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นผง จะทำการเตรียมตัวอย่างแบบ KBr-disc โดยวิธีการคือ บดสารตัวอย่างปริมาณ 1-2 มิลลิกรัม รวมกับผง KBr ปริมาณ 100 มิลลิกรัม อบให้แห้งแล้วบดรวมกัน จากนั้นทำการอัดเป็นแผ่นโดยใช้เครื่อง Mini press จนได้ตัวอย่างที่มีลักษณะกลมแบนใสคล้ายแก้ว (KBr Disc) แล้วนำตัวอย่างวางบนลำรังสี IR จากนั้นวิเคราะห์เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง

3.4.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือเทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างโดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นกับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ในการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ จึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างผลึกของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผง รวมถึงแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ซึ่งตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงเตรียมได้โดยการบดผงของสารตัวอย่างให้ละเอียดพอประมาณ จากนั้นนำไปอัดลงบนแผ่นกระจกที่มีลักษณะเป็นหลุมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร มีความลึกประมาณ 3 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)

3.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

ใช้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของพื้นผิวและภาพตัดขวางของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เนื่องจากตัวอย่างมีลักษณะเป็นแผ่นยางอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงเกิดปัญหาการ Charge up จึงต้องทำการเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำ นำสารตัวอย่างไปติดบน Stub เพื่อให้การฉาบผิวทำได้ทั่วถึง จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการเคลือบทอง แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 3000 6000 และ 10000 เท่า

3.4.5 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX)

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ ธาตุคาร์บอนถึงธาตุยูเรเนียม ทดสอบได้ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือเป็นผง วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ หลักการของเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งผ่านวัสดุหรือการเข้านเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าปะทะเยนชันด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคนี้คือ ให้รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนสารตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์จะทำให้อิเล็กตรอนในวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออกไป อิเล็กตรอนในวงถัดมาจะเข้ามาแทนที่และคายพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุนั้น เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และความเข้มข้นของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ซึ่งจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีติวซักร้าฟีนออกไซด์กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์

3.4.6 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์วัตถุตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์หาชนิด (Qualitative Analysis) ของตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เช่น อัญมณี แร่ และวัสดุต่างๆ โดยส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งไม่สามารถแสดงสเปกตรัมในช่วงอินฟราเรด โดยหลักการของรามานสเปกโตรมิเตอร์จะตรวจสอบโดยการวัดเปรียบเทียบการกระเจิงแสงแบบรามานของวัสดุหรือสารที่ใช้ในการตรวจสอบ ใช้หาความยาวพันธะในโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว ซึ่งจะทำให้สามารถระบุหาประเภทของสารตัวอย่างได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนั้นจึงใช้วัสดุสารได้ทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จึงนำเทคนิคดังกล่าวนี้มาใช้ในการศึกษาชนิดของสารประกอบที่อยู่ในรูปกราฟีนออกไซด์และรีติวซักร้าฟีนออกไซด์

3.4.7 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูงในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมได้ สามารถใช้ในการศึกษาสมบัติของตัวอย่างได้หลากหลายชนิด ทั้งตัวอย่างในกลุ่มเซรามิก พอลิเมอร์หรือสารอนินทรีย์ต่างๆ สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนักรวมไปจนถึงการหาสารเจือปนในตัวอย่างได้ จึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีติวซักร้าฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยเตรียมแผ่นยางผสมที่เตรียมได้ให้มีน้ำหนักประมาณ 8-12 มิลลิกรัม บรรจุลงในจาน (Pan) ที่แขวนอยู่บน Micro balance แล้วทำการทดสอบโดยการตั้งโปรแกรมทดสอบให้ความร้อนต่อชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

3.4.8 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

สมบัติการต้านทานแรงดึงของวัสดุ เป็นตัวบ่งบอกความแข็งแรงและความสามารถในการทนรับแรงดึงของวัสดุจนขาดในระยะเวลาสั้นๆ ด้วยอัตราการดึงคงที่ โดยการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine; UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยเตรียมชิ้นงานและกำหนดสภาวะกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

- ขนาดชิ้นงาน 10 x 70 ตารางมิลลิเมตร
- ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที
- ความยาวเกจ (Gauge length) 30 มิลลิเมตร
- ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ 1 นิวตัน
- จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ 8 ชิ้นต่อชิ้นงาน

โดยการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) รวมถึงค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ค่าการคงรูป (Stiffness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขอสงวนสิทธิ์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเค้นสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) จึงนำมาใช้ในการศึกษาหาค่าความแข็งแรงเชิงกลของยางธรรมชาติและแผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ อนุภาคนาโนซิลเวอร์

3.4.9 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-Bacterial test)

ทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้วิธีวิธี Agar disc diffusion ซึ่งวิเคราะห์ผลการทดลองจากการเกิดโซนยับยั้ง (Inhibition zone) บนจานเลี้ยงเชื้อโดยทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดได้แก่ *Staphylococcus aureus* (แกรมบวก) และ *Escherichia coli* (แกรมลบ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

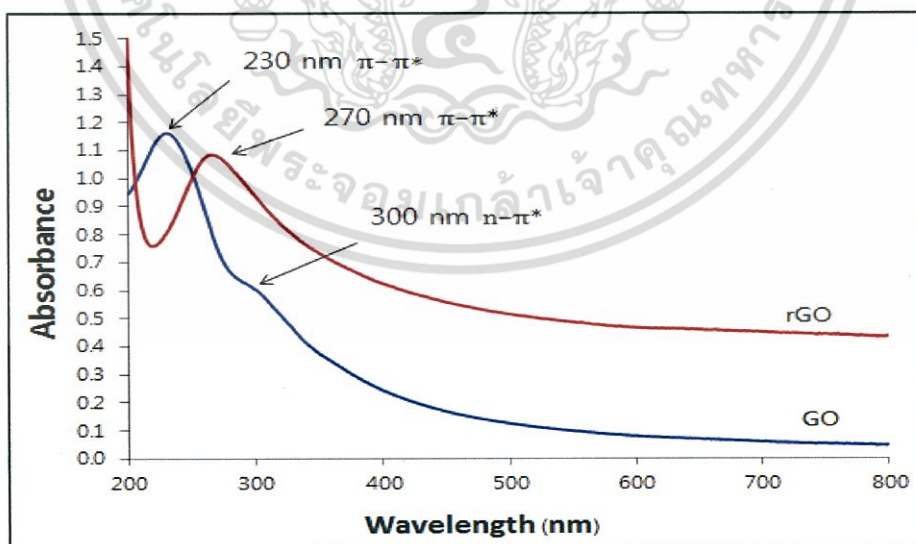
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมสารละลายรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยไฮดราซีน และสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยตู้ไมโครเวฟโดยมีพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นสารรักษาเสถียรภาพ จากนั้นทำการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ การดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrometry) ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR) พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน (Raman Spectroscopy) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (EDX) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) สมบัติเชิงความร้อน (TGA) สมบัติเชิงกล (Tensile Testing) การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-bacterial Testing) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1. ผลการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสงของสาร

4.1.1 กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เทคนิค UV-visible spectrophotometry เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างของแผ่นกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ที่ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮดราซีนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1



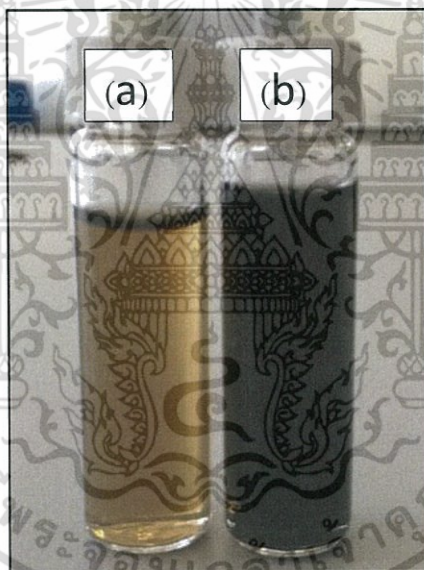
รูปที่ 4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสง พบว่ากราฟีนออกไซด์ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 230 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะจาก $\pi-\pi^*$ และพบพีกเล็กๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 270 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะจาก $n-\pi^*$ และพบพีกเล็กๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 300 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะจาก $n-\pi^*$ สำหรับ rGO

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นประมาณ 300 นาโนเมตรซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะจาก $n-\pi^*$ ซึ่งโดยทั่วไป $\pi-\pi^*$ จะเกิดได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 220 นาโนเมตร เป็นต้นไป ขึ้นอยู่กับว่าโมเลกุลมีพันธะคู่โดด (Isolate double bond) หรือพันธะคู่ต่อเนื่อง (Conjugated double bond) กับโครโมฟอร์อื่น ถ้าเป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่ต่อเนื่อง อิเล็กตรอนใน π ออบิทัลหนึ่งสามารถกระจายไปยัง π ออบิทัลอื่นที่มีอยู่ในโมเลกุลนั้นได้ ส่งผลให้พันธะคู่ระหว่าง คาร์บอน-คาร์บอน (C=C) ยิ่งอ่อนลง ทำให้ใช้พลังงานในการทรานซิชันลดลง ส่วนการเปลี่ยนสถานะ $n-\pi^*$ เกิดกับโมเลกุลที่มีทั้ง n (non-bonding) และ π ออบิทัล ซึ่งได้แก่ สารประกอบคาร์บอกซิลิกหรือคีโตนที่มีหมู่ คาร์บอน-ออกซิเจน (C=O) หลังจากทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แล้ว พบว่าตำแหน่ง $\pi-\pi^*$ เกิดการเลื่อนตำแหน่ง (Shift) ไปที่ความยาวคลื่นที่มากขึ้น (Red shift) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะคู่ระหว่าง คาร์บอน-คาร์บอน (C=C) ที่เพิ่มขึ้นในโครงสร้างของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง $n-\pi^*$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารประกอบคาร์บอกซิลิกหรือคีโตน (C=O) ถูกกำจัดออกไปจากโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ [37]

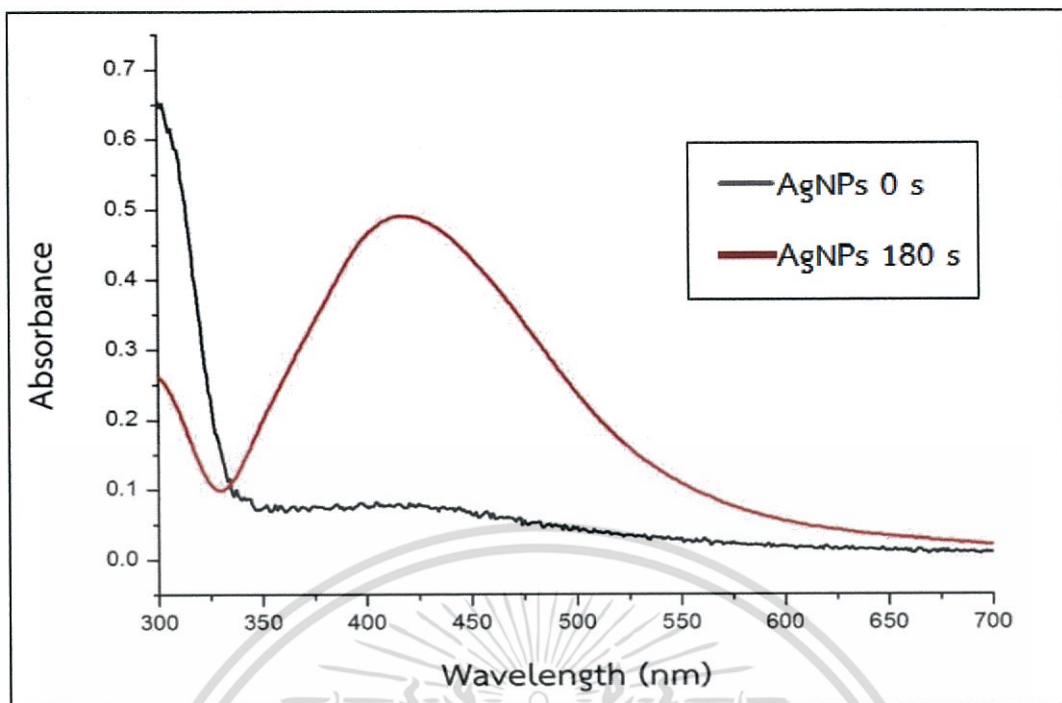
โดยทั่วไปการรีดิวซ์ที่สมบูรณ์สามารถสังเกตอย่างง่าย ๆ ได้จากสีของสารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่าสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์จะเปลี่ยนจากสารแขวนลอยสีน้ำตาลเป็นสารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายสารแขวนลอยของกราฟีนออกไซด์ (a) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) (b)

4.1.2 อนุภาคนาโนซิลเวอร์

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (AgNPs) ก่อนไมโครเวฟและหลังไมโครเวฟ ที่ได้จากกระบวนการให้พลังงานด้วยตู้อไมโครเวฟ ผลแสดงในรูปที่ 4.3



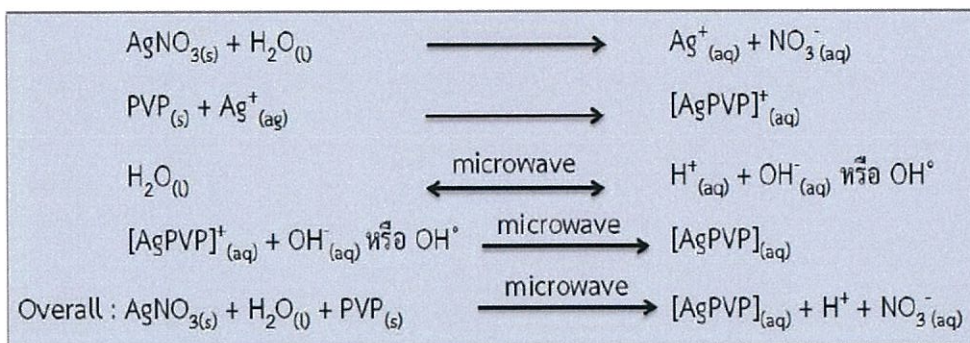
รูปที่ 4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงอนุภาคนาโนซิลเวอร์ก่อนและหลังไมโครเวฟ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าสารละลายซิลเวอร์ก่อนที่จะได้รับคลื่นไมโครเวฟ ไม่พบค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ แต่เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 180 วินาที จะพบพีคค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 420 นาโนเมตร [25] ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ซึ่งสามารถยืนยันการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์อย่างคร่าวๆ ได้จากสีของสารแขวนลอย ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สำหรับกลไกที่เป็นไปได้ของการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) และ PVP เป็นสารตั้งต้น แสดงไว้ในสมการดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายลักษณะของสารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์ (a) ไมโครเวฟ 0 วินาที (b) ไมโครเวฟ 180 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

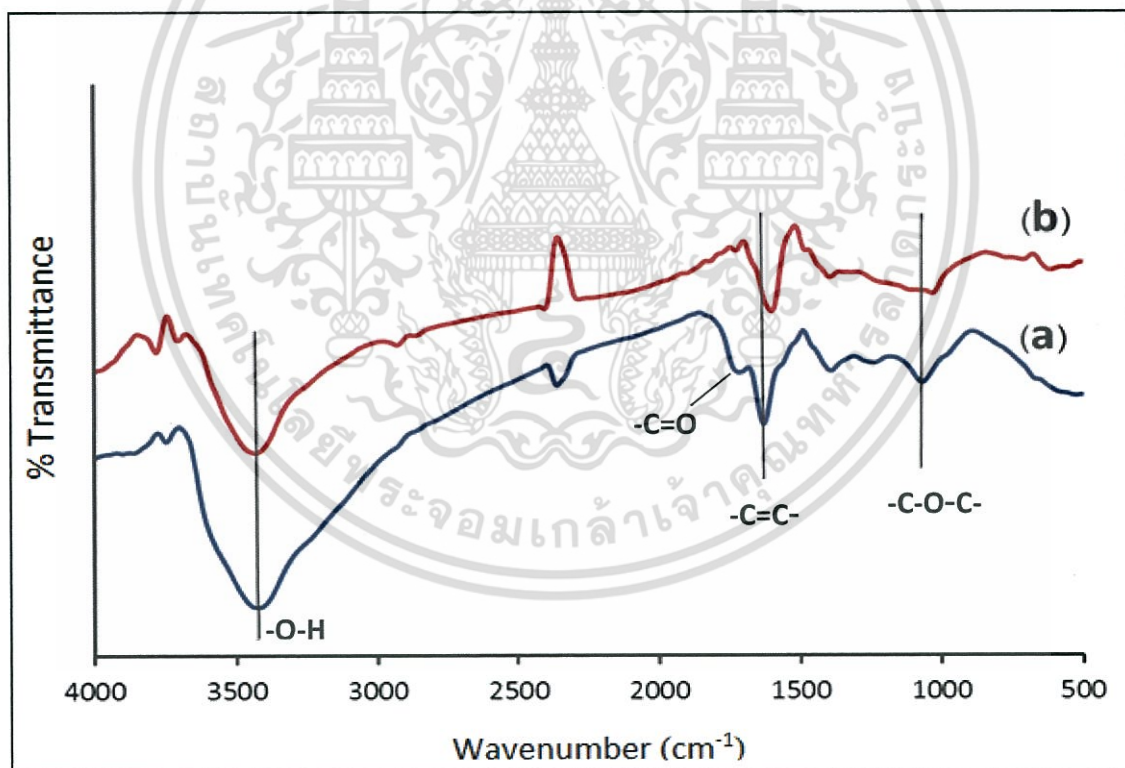


รูปที่ 4.5 แสดงสมการที่อาจจะเป็นไปได้ของการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (AgNPs)

4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล

4.2.1 กราฟอินฟราเรด และรีดิวซ์กราฟอินฟราเรด

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของ FT-IR ของกราฟไฟต์กราฟอินฟราเรด และรีดิวซ์กราฟอินฟราเรด ซึ่งแสดงผลการศึกษาดังต่อไปนี้



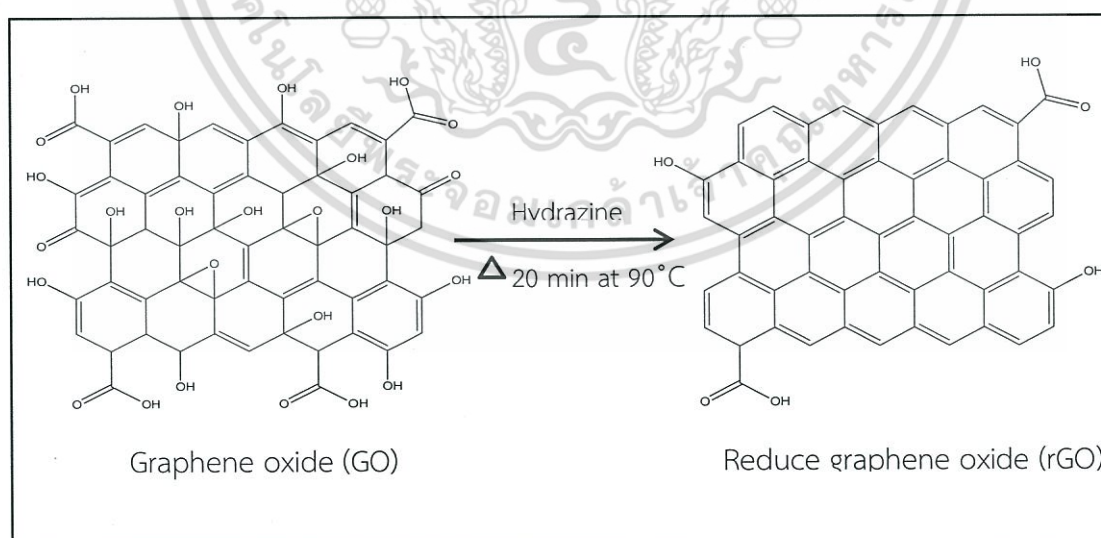
รูปที่ 4.6 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ (a) กราฟไฟต์ออกไซด์ (GO) และ (b) รีดิวซ์กราฟอินฟราเรด (rGO)

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.1 พบแถบการสั่นของกราฟอินฟราเรดปรากฏความถี่ที่เลขคลื่น 3442 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ (-O-H) พบแถบการสั่นความถี่ที่เลขคลื่น 1625 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ (-C=C-) ของวงอะโรมาติก ปรากฏการสั่นที่เลขคลื่น 1722 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของเอกซาคาร์บอนเป็นเอกซาคาร์บอนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะ ($\text{C}=\text{O}$) ของสารประกอบคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลิก และแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1054 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) ของแอลคอกซี ซึ่งเป็นการยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ในกราฟีนออกไซด์ การปรากฏแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ เนื่องมาจากกระบวนการออกซิไดซ์จากกราฟไฟต์ให้เป็น กราฟีนออกไซด์จึงทำให้หมู่ฟังก์ชัน คาร์บอนิล คาร์บอกซิลิก และอีพอกซีเกิดขึ้นที่วงอะโรมาติกของ กราไฟต์ ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ แต่เมื่อทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะพบแถบการสั่นที่ 3450 cm^{-1} ($\text{O}-\text{H}$) และพบแถบการสั่นความถี่ที่เลขคลื่น 1632 cm^{-1} ($\text{C}=\text{C}$) แต่ไม่พบการสั่นความถี่ที่เลขคลื่นประมาณ 1700 cm^{-1} และที่ 1100 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของสารประกอบคาร์บอนิล คาร์บอกซิลิกและ อีพอกซี ตามลำดับ เป็นการยืนยันได้ว่าการรีดิวซ์หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ออกจากกราฟีนออกไซด์ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีที่เป็นไปได้ของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แสดงไว้ในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบแถบการสั่นที่สำคัญของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์		รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	
การสั่นของพันธะ	ความถี่ (cm^{-1})	การสั่นของพันธะ	ความถี่ (cm^{-1})
O-H stretching	3442	O-H stretching	3432
C=C stretching	1625	C=C stretching	1632
C=O stretching	1722		
C-O stretching	1054		



รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีที่เป็นไปได้ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

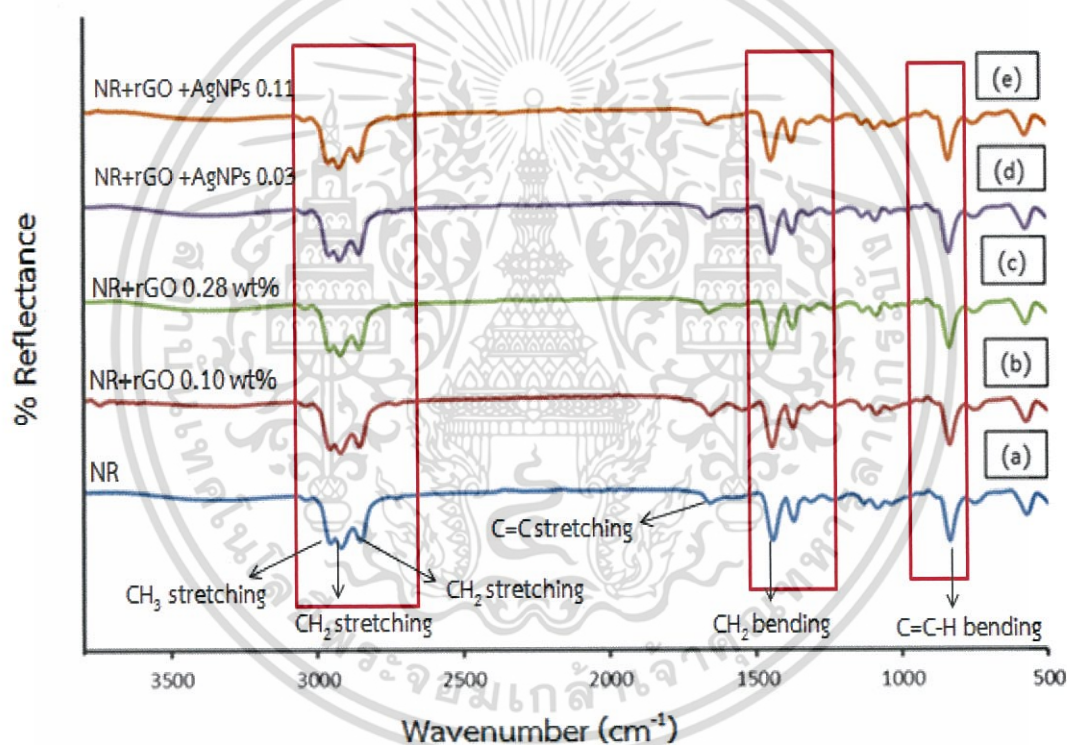
4.2.2 แผ่นยางธรรมชาติผสม

การวิเคราะห์ FT-IR ที่ใช้ในการวิเคราะห์แผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางธรรมชาติผสม โดยใช้ FT-IR ชนิด ATR-FT-IR ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยไม่ต้องบด สามารถนำมาตรวจวิเคราะห์ได้ทันที

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติผสม แบ่งชนิดของแผ่นยางธรรมชาติผสมเป็น 3 ชนิดคือ

- แผ่นยางธรรมชาติ
- แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.10 และ 0.28 โดยน้ำหนัก
- แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.03 และ 0.11 โดยน้ำหนัก

แสดงผลการศึกษาในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบแผ่นยางธรรมชาติ (a) แผ่นยางธรรมชาติที่ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.10 (b) และ 0.28 (c) โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.03 (d) และ 0.11 (e) โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.8 แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในทุกปริมาณ ในรูป 4.8 (a) แผ่นยางธรรมชาติ จะพบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 2955 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบยืดของ CH_3 พบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 2917 cm^{-1} เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 2851 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบยืดแบบสมมาตรและไม่สมมาตรของ CH_2 ตามลำดับ พบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1657 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ พบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1443 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบงอของ CH_2 และพบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 835 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบงอของ $\text{C}=\text{C}-\text{H}$ ซึ่งจากการเปรียบเทียบสเปกตรัม FT-IR ในรูป 4.8(b) - (e) ล้วนแล้วแต่มีแถบการสั่นความถี่เลขคลื่นใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเติมปริมาณของสารตัวเติมคือ รีติวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไปในพื้นที่ในแผ่นยางธรรมชาติในอัตราส่วนที่น้อยมากๆ เมื่อเทียบกับปริมาณของน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น ซึ่งส่งผลให้แถบการสั่นของยางธรรมชาติบดบังแถบการสั่นของสารประกอบที่เกิดจากการใส่สารตัวเติม ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงแถบการสั่นของยางธรรมชาติผสมรีติวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์

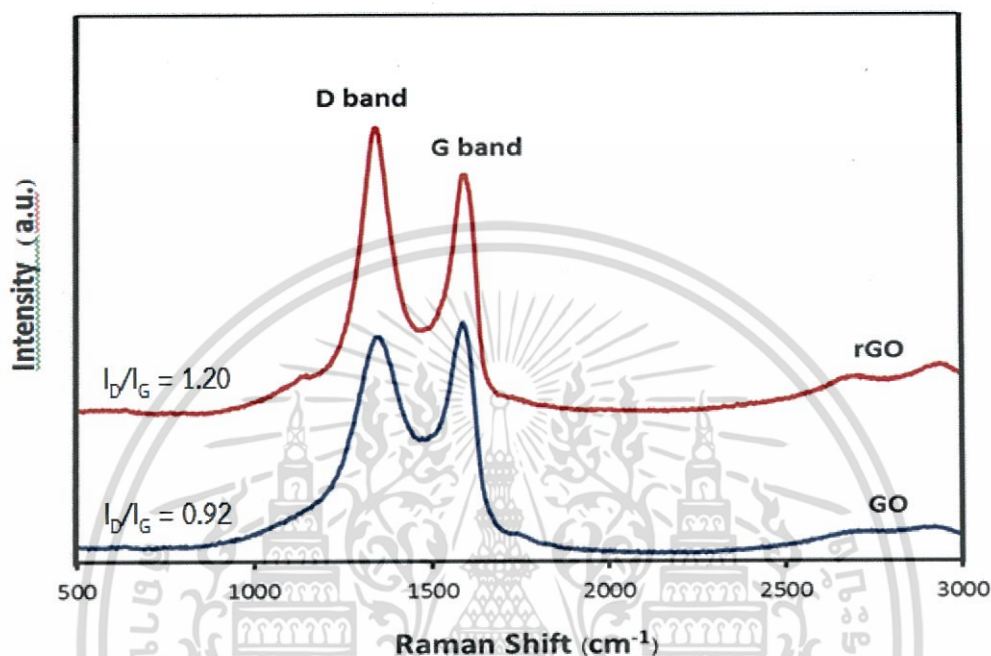
การสั่นของพันธะ	ความถี่ (cm^{-1})
CH_3 stretching	~ 2955
CH_2 asymmetry stretching	~ 2917
CH_2 symmetry stretching	~ 2851
$\text{C}=\text{C}$ stretching	~ 1657
$-\text{C}-\text{H}_2$ bending	~ 1443
$\text{C}=\text{C}-\text{H}$ bending	~ 835

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน

4.3.1 กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

โดยเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะแสดงในรามานสเปกตราดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

จากรูปที่ 4.9 พบว่าจากการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ จะเกิดความบกพร่อง (Defect) และความไม่เป็นระเบียบ (Disorder) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในขั้นตอนการเตรียมกราฟีนออกไซด์ ซึ่งแสดงพีคของตำแหน่ง D band ที่ 1331 cm^{-1} และตำแหน่ง G band ที่ 1578 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างที่มีความไม่เป็นระเบียบและความบกพร่องที่เกิดขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่าง I_D/I_G มีค่าเท่ากับ 0.92 ต่อมาเมื่อนำกราฟีนออกไซด์ผ่านปฏิกิริยารีดักชันด้วยไฮดราซีนเปลี่ยนเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล และอีพอกซี เกิดขึ้นในโครงสร้าง พบว่าเกิดความบกพร่อง (Defect) และความไม่เป็นระเบียบ (Disorder) ของโครงสร้างวงอะโรมาติกเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แสดงพีค G band ที่ตำแหน่งประมาณ 1584 cm^{-1} และพีค D band ที่ตำแหน่ง 1338 cm^{-1} โดยมีอัตราส่วนระหว่าง I_D/I_G เพิ่มขึ้นจาก 0.92 เป็น 1.20 ซึ่งค่า D band มากกว่าค่า G band แสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้ถูกกำจัดออกไปบางส่วน อีกทั้งไฮดราซีนซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์เอเจนต์ที่รุนแรง จึงทำให้โครงสร้างของแผ่นกราฟีนฉีกขาดและมีขนาดเล็กลง จึงเกิดความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างภายใน

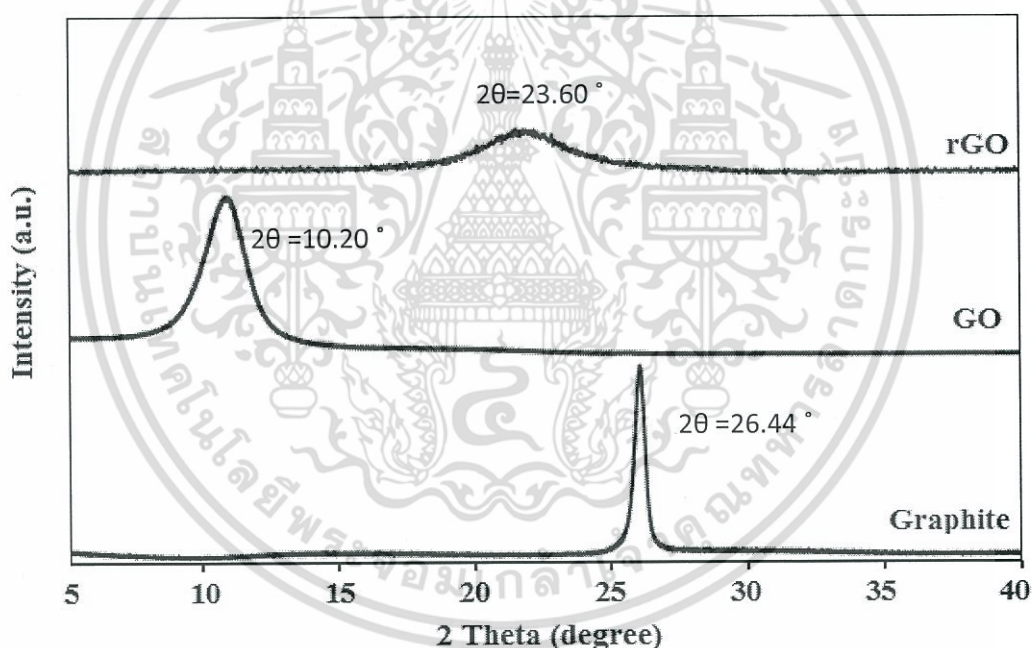
แผ่นกราฟีนเพิ่มขึ้น [38] สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐาน

เทคนิค XRD ใช้หลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบที่ผิวหน้าผลึกของตัวอย่าง ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยจะมีห้วงวัดเป็นตัวรับข้อมูล องศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างแผ่นบางผสม ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิด และเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-Destructive Method) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

4.4.1 กราไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.10



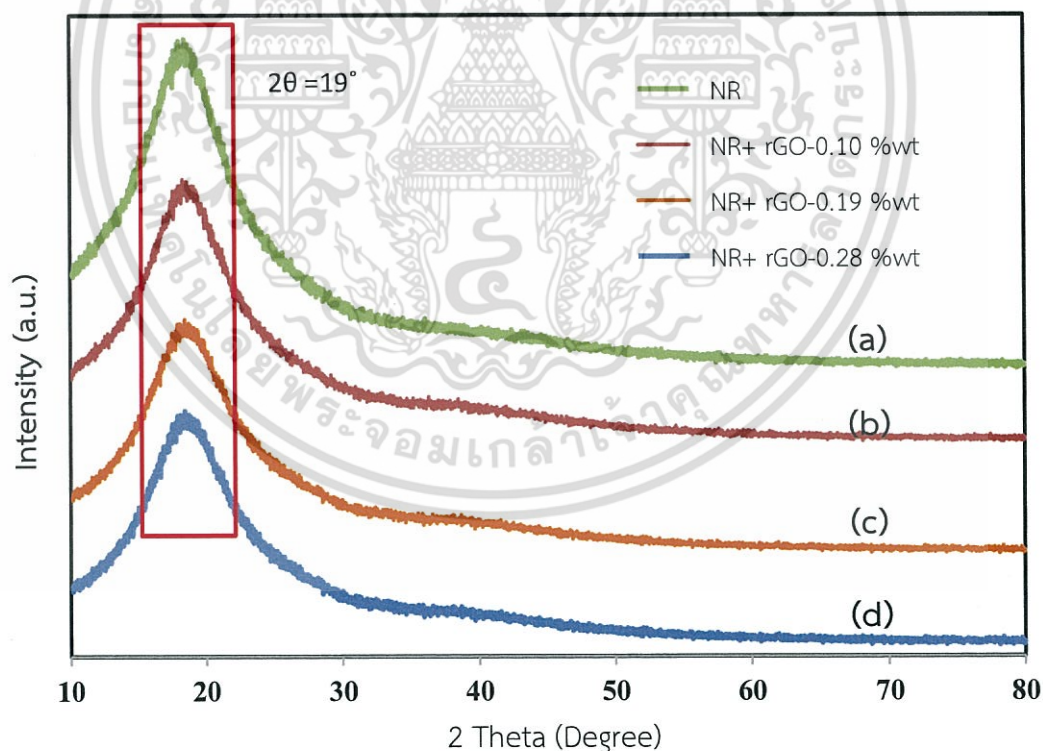
รูปที่ 4.10 แสดง XRD Pattern ของผงกราฟไฟต์ (Graphite) ผงกราฟีนออกไซด์ (GO) และผงรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)

จากรูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จะเห็นว่าพบพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.44° มีระยะห่างระหว่างระนาบคือ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งเป็นมุมการเลี้ยวเบนของกราฟไฟต์ [39] เนื่องจากกราฟไฟต์ที่เกิดจากการเรียงกันเป็นชั้นๆของกราฟีน ที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง ซึ่งยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ไม่สามารถละลายน้ำได้ และมีความเป็นผลึกสูง ทำให้ให้พีคที่มีความเข้มที่สูง เอกสาแตเมื่อนำผงกราฟไฟต์ไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกรดเข้มข้นคือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) หลังการปรับสภาพทำให้มีหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) หมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) หมู่คาร์บอนิล ($-\text{C}=\text{O}$) และหมู่อีพอกซี ($\text{C}-\text{O}$) เกิดขึ้นบนวงแหวนของแผ่นคาร์บอน จึงทำให้ความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น กราฟไฟต์ออกไซด์นี้จึงสามารถแขวนลอยในน้ำได้ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ที่แทรกอยู่ตามชั้นของกราฟไฟต์ ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นผลึกมีมากขึ้น และเป็นผลให้ความเป็นผลึกนั้นลดลงทำให้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต่างจากกราฟไฟต์ออกไซด์คือ เกิดพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 10.20° มีระยะห่างระหว่างระนาบ คือ 0.86 นาโนเมตร เมื่อทำการรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์จะพบว่าพีคได้เกิดการเลื่อนไปที่มุม 2θ เท่ากับ 23.60° มีระยะห่างระหว่างระนาบ คือ 0.38 นาโนเมตร จากการเลื่อนของตำแหน่งพีคดังกล่าวบ่งบอกได้ว่ารีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์มีระยะห่างระหว่างชั้นที่น้อยกว่า กราฟไฟต์ออกไซด์ เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างลดลง เมื่อหมู่ออกซิเจนและหมู่ไฮดรอกซิลบางส่วนได้หลุดออกไปจากโครงสร้าง โดยความเป็นผลึกที่ลดลงของรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์ นั้นเป็นการยืนยันได้ว่ากราฟไฟต์ออกไซด์ได้ถูกเปลี่ยนเป็นรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์

4.4.2 แผ่นยางธรรมชาติผสม

ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัญฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

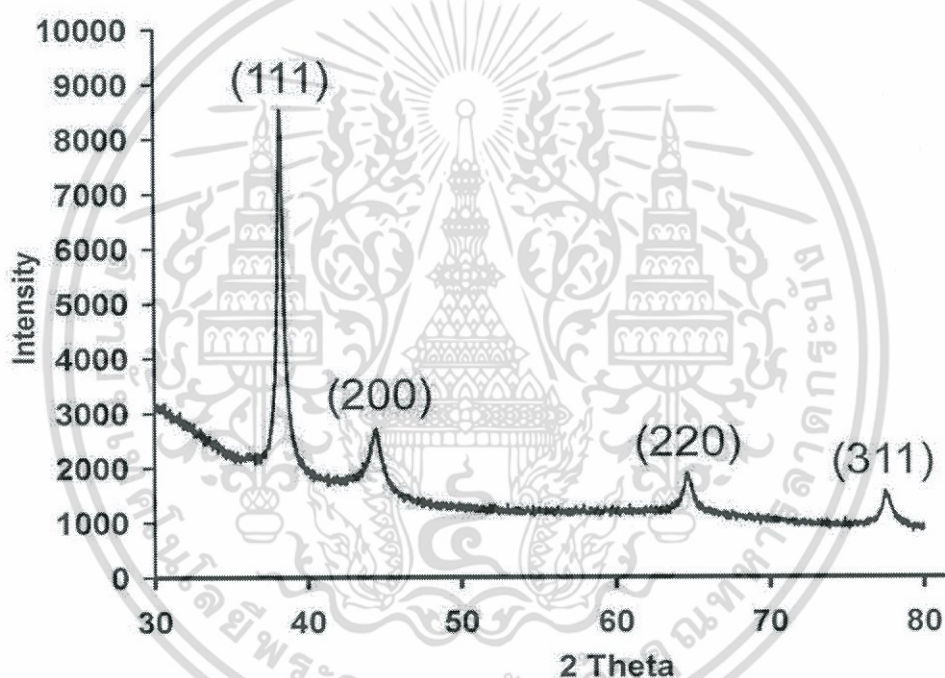


รูปที่ 4.11 แสดง XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ (a) แผ่นยางธรรมชาติ (b) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์ 0.10 wt.% (c) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์ 0.19 wt.% (d) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์ 0.28 wt.%

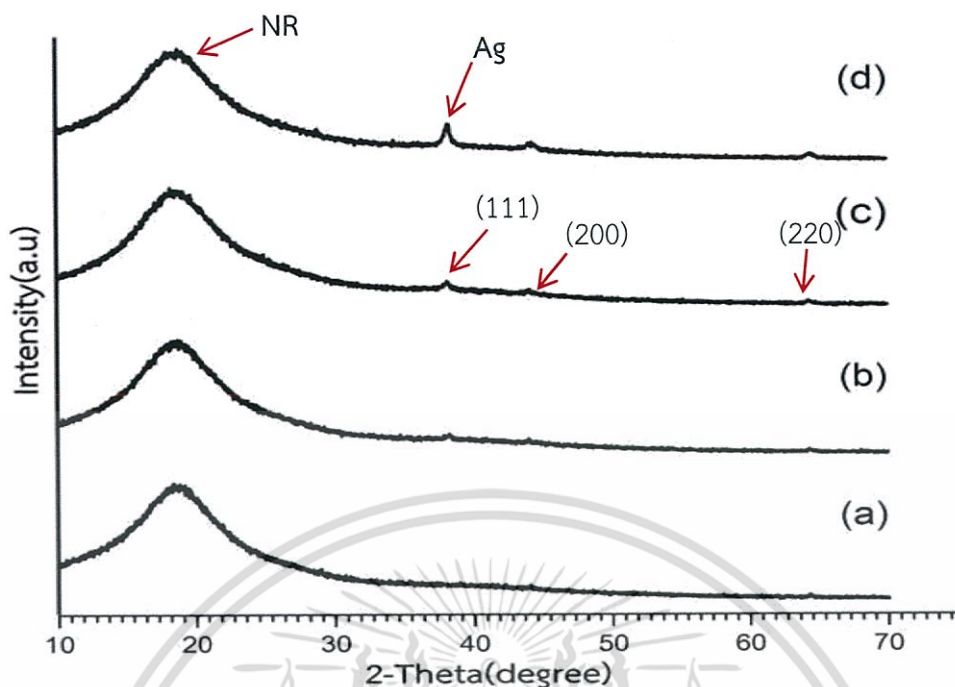
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD ในรูป 4.11 (a)–(d) พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19° ซึ่งเป็นพีคที่เป็นแถบกว้างเนื่องจากการเลี้ยวเบนของยางธรรมชาติซึ่งมีลักษณะเป็น ออสัญฐาน [40] แต่ไม่พบพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 23.60° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจากอาจถูกบดบังโดยพีคที่เป็นแถบกว้างของยางธรรมชาติที่ขึ้นพีคแถบกว้างในบริเวณใกล้เคียงกัน และในงานวิจัยนี้มีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไปปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติจึงทำให้ไม่สามารถมองเห็นพีคของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้

ผลวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัญฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นยางธรรมชาติกับแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ แสดงดังรูป 4.13 และ XRD pattern ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จากงานวิจัยอ้างอิง แสดงดังรูป 4.12



รูปที่ 4.12 แสดง XRD pattern ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จากงานวิจัยอ้างอิง [41]



รูปที่ 4.13 แสดง XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (0.28 wt.%) ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ (a) แผ่นยางธรรมชาติ (b) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 0.03 wt.% (c) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 0.05 wt.% (d) แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 0.11 wt.%

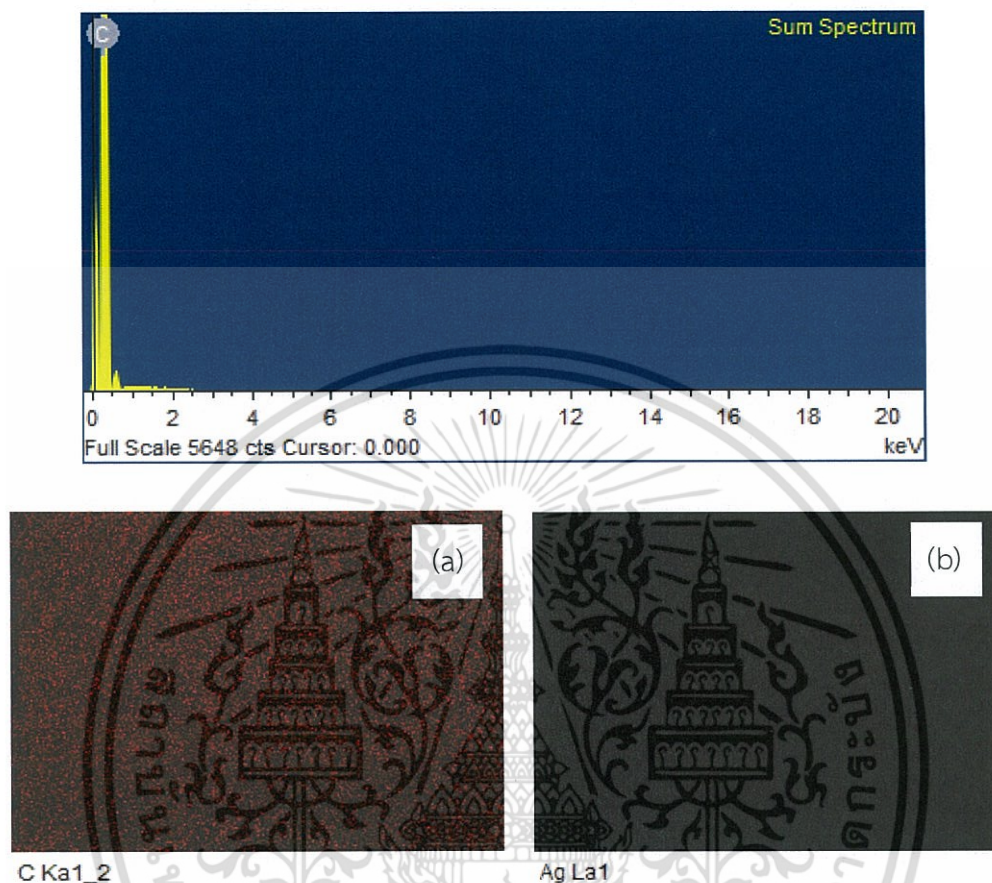
จากรูปที่ 4.13 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าในทุกตัวอย่างก็จะพบพีคที่เป็นแถบกว้างอยู่ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19° ซึ่งเป็นพีคที่เป็นแถบกว้างของยางธรรมชาติที่มีลักษณะเป็น ออสเจอร์น และในตัวอย่าง (b)-(d) พบว่าพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38° 44° และ 64° จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนซิลเวอร์มากขึ้น ที่มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เหล่านี้เมื่อเทียบค่าดัชนีแล้วจะสื่อถึงระนาบ (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0) ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าเป็นระนาบของวัฏภาคของซิลเวอร์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic (fcc) [42], [43], [44], [45] และเกิดที่ตำแหน่งเดียวกันกับรูปที่ 4.13 ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ P. Phanjom ซึ่งได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วย *Aspergillus oryzae* (MTCC No. 1846)

4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

เป็นการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิว โดยจะมุ่งเน้นไปที่ธาตุคาร์บอน (C) และซิลเวอร์ (Ag) โดยตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีทั้งหมด 4 ตัวอย่าง คือ แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ร้อยละ

0.05 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.05 wt.%) และ 0.11 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.11 wt.%) ซึ่งแสดงผลวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

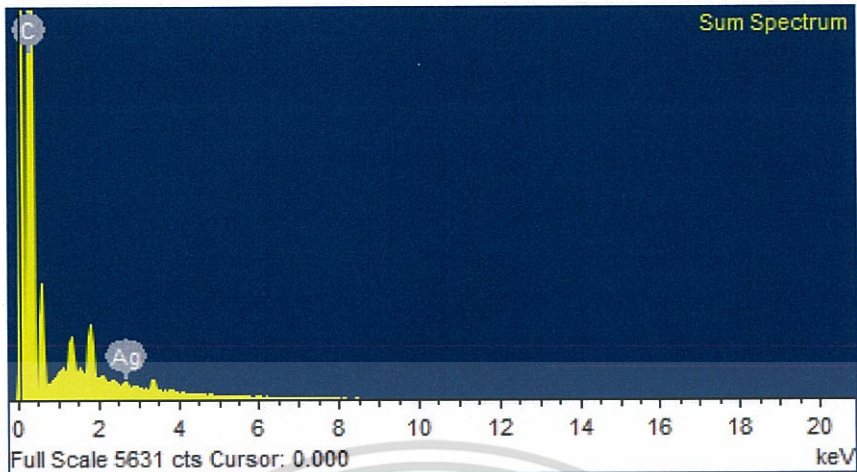
4.5.1 แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม



รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR) และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (a) และธาตุซิลเวอร์ (b)

จากรูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure) ตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างเพียงชนิดเดียวคือ คาร์บอน (C) ซึ่งมาจากคาร์บอนที่อยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ และแผนที่ธาตุภาพพบแค่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอนในแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure) โดยทั่วไปดังภาพ (a)

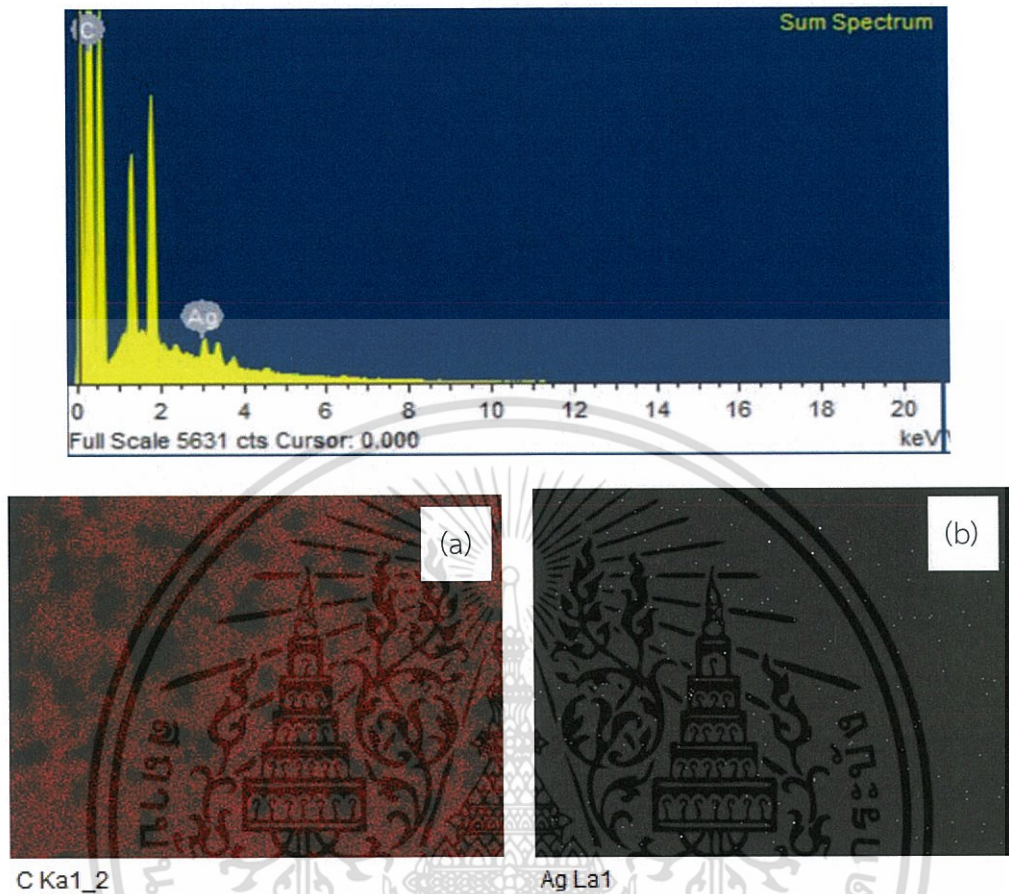
4.5.2 แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%) และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (a) และธาตุซิลเวอร์ (b)

จากรูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.19 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.19 wt.%) ตรวจสอบวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างเพียงชนิดเดียวคือ คาร์บอน (C) ซึ่งมาจากคาร์บอนที่อยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และจากแผนที่ธาตุพบแค่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอนอย่างหนาแน่นเมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมเป็นเพราะปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป ดังภาพ (a)

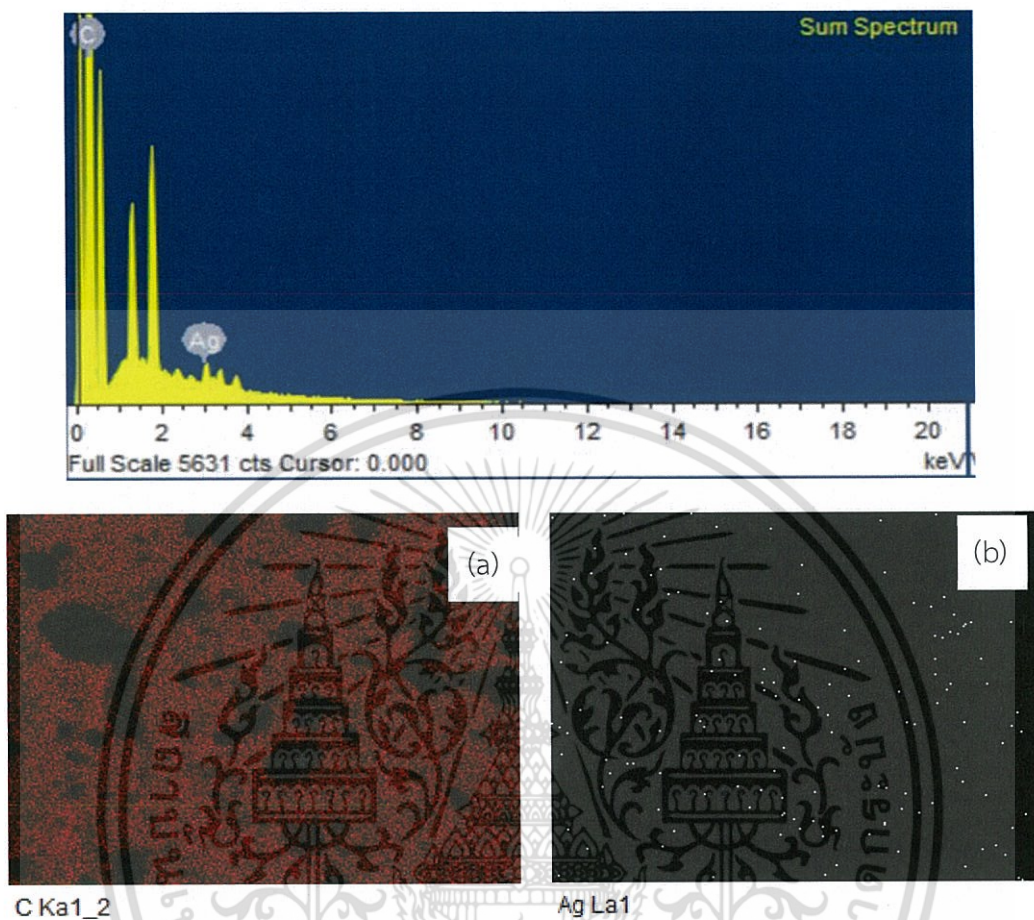
4.5.3 แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.05 wt.%)

จากรูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักตรวจวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดคือ คาร์บอน (C) และซิลเวอร์ (Ag) ซึ่งมาจากคาร์บอนที่อยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ส่วนซิลเวอร์มาจากการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไปและจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนอย่างหนาแน่น ดังภาพ (a) และการกระจายตัวของธาตุซิลเวอร์เพียงเล็กน้อย ดังภาพ (b)

4.5.4 แผนยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก



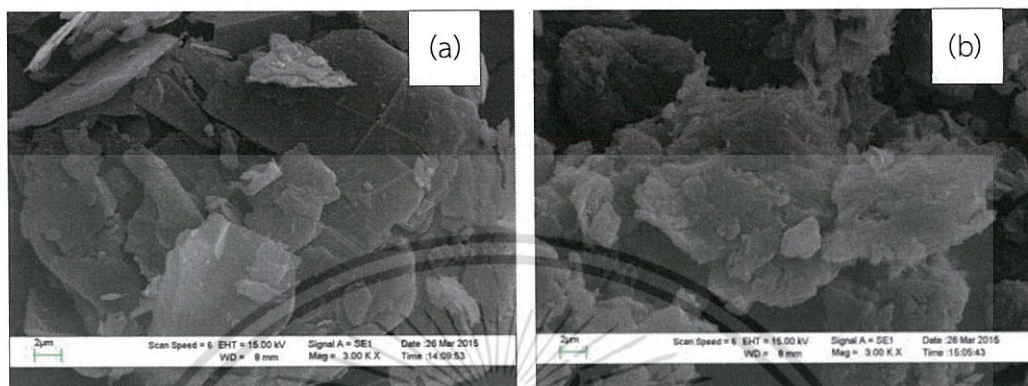
รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.11 wt.%)

จากรูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก ตรวจสอบวิเคราะห์พบธาตุบนผิวของตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดคือ คาร์บอน (C) และซิลเวอร์ (Ag) ซึ่งมาจากคาร์บอนที่อยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ส่วนซิลเวอร์มาจากการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไปและจากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนอย่างหนาแน่น ดังภาพ (a) และการกระจายตัวของธาตุซิลเวอร์ในปริมาณใกล้เคียงกับแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ดังภาพ (b)

4.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค

4.6.1 กราไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของของสารตัวอย่างในระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) โดยทำการศึกษามงกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งแสดงผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.18 – 4.19



รูปที่ 4.18 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM เปรียบเทียบระหว่างบริเวณพื้นผิวที่กำลังขยาย 3000x เท่า (a) กราไฟต์ (b) กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM เปรียบเทียบระหว่าง (a) กราฟีนออกไซด์ กำลังขยาย 3000x เท่า (b) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ กำลังขยาย 5000x เท่า

จากรูปที่ 4.18 – 4.19 แสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเปรียบเทียบระหว่างกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่ากราฟไฟต์มีลักษณะเป็นแผ่นเกรนขนาดใหญ่ ลักษณะผิวเรียบและเรียงตัวเป็นระเบียบมากกว่าเมื่อเทียบกับ กราฟีนออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ดเล็กๆ ซ้อนทับกันอยู่และลักษณะแผ่นไม่เรียบ ส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นเกล็ดแผ่นใหญ่บางซ้อนทับกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 แผ่นยางธรรมชาติผสม

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของของสารตัวอย่างในระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) โดยทำการศึกษาบริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) แผ่นยางธรรมชาติผสม 2 ชนิดคือ

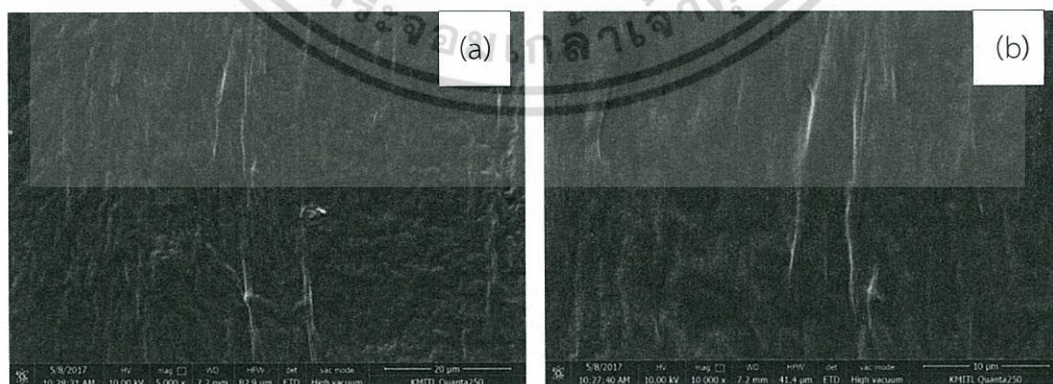
- แผ่นยางธรรมชาติผสมที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.19 และ 0.28 โดยน้ำหนัก
- แผ่นยางธรรมชาติผสมที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.6.2.1 บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section)

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของของสารตัวอย่างในระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) โดยทำการศึกษาบริเวณพื้นผิว (Surface) แสดงผลการศึกษาในรูปที่ 4.20 – 4.26

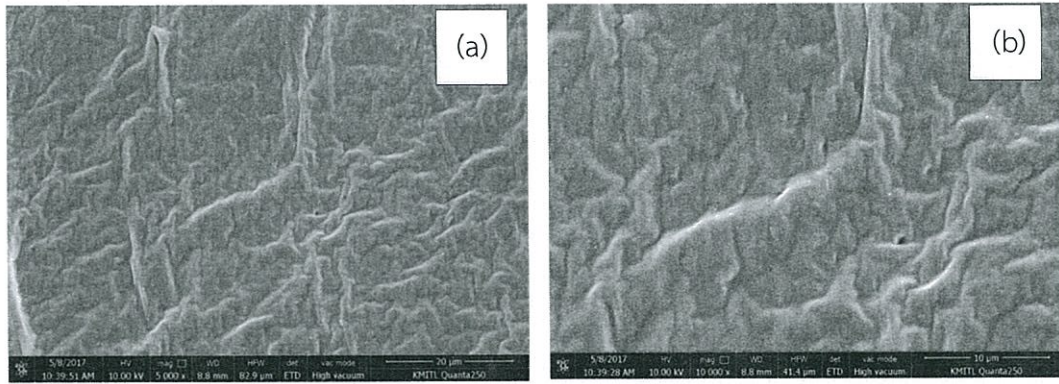


รูปที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงบริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติกำลังขยาย 5000x เท่า

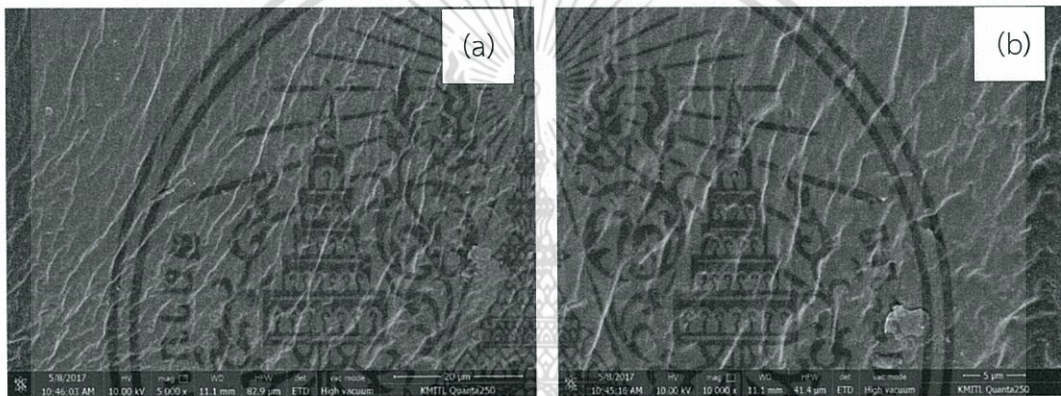


รูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.19 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย (a) 5000x เท่า (b) 10000x เท่า

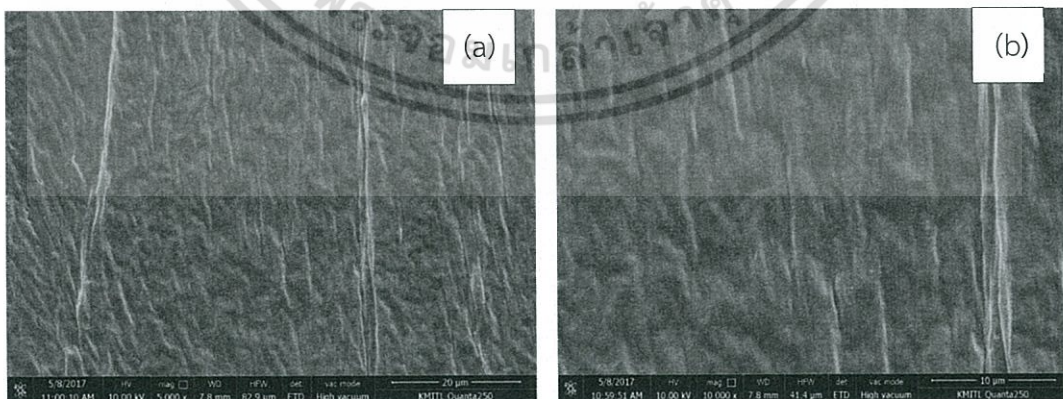
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย (a) 5000x เท่า (b) 10000x เท่า



รูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย (a) 5000x เท่า (b) 10000x เท่า



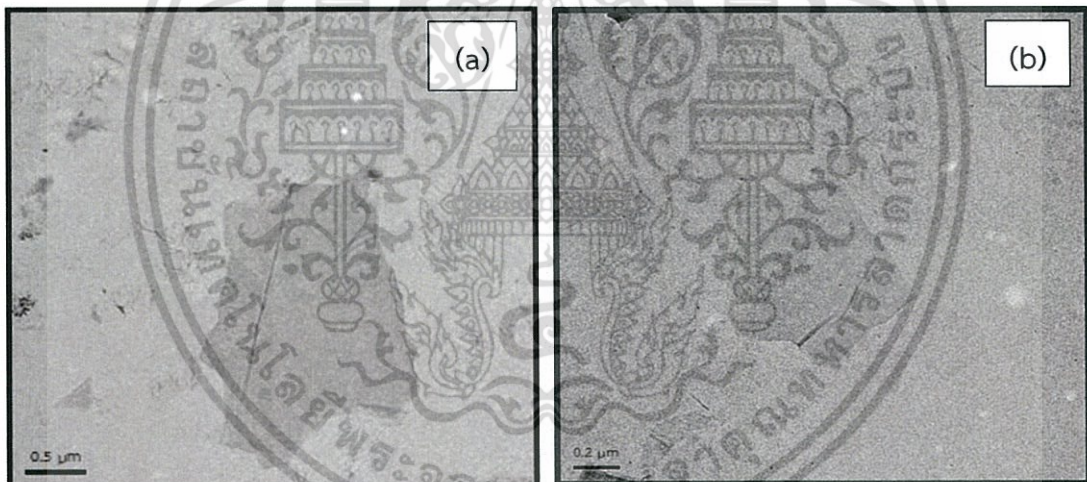
รูปที่ 4.24 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก กำลังขยาย (a) 5000x เท่า (b) 10000x เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติในรูปที่ 4.20 พบว่าภาพตัดขวางมีลักษณะเรียบ แต่เมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.19 และ 0.28 โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.21 - 4.22 ลงในแผ่นยางธรรมชาติ เมื่อปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณภาพตัดขวางมีลักษณะเป็นรอยย่นและขรุขระมากขึ้น เนื่องจากมีการกระจายตัวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ดีตามปริมาณของการเติมลงไป ส่วนภาพตัดขวางแผ่นยางธรรมชาติที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนักในรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่าภาพตัดขวางมีลักษณะเป็นรอยย่นในลักษณะเดียวกันกับแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

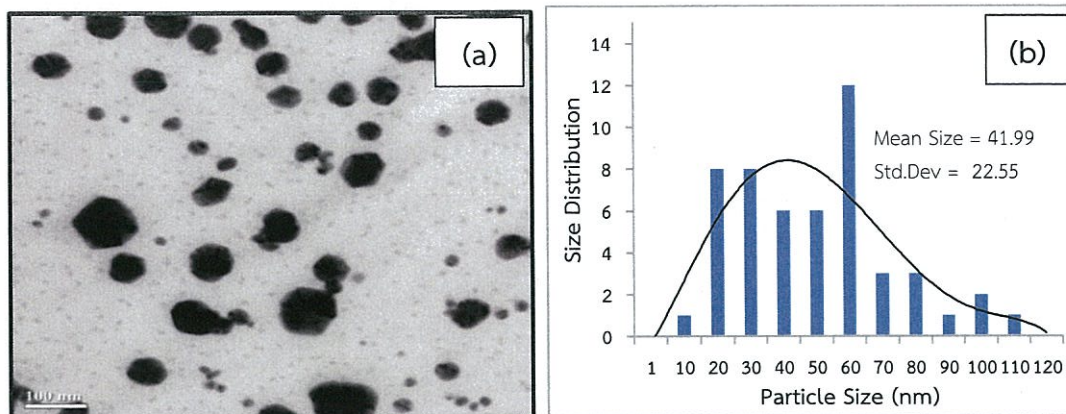
4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ผลการวิเคราะห์ขนาดและอนุภาคของสารตัวเติม 4 ตัวอย่าง คือ สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ สารแขวนลอยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และสารแขวนลอยที่ผสมระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.25



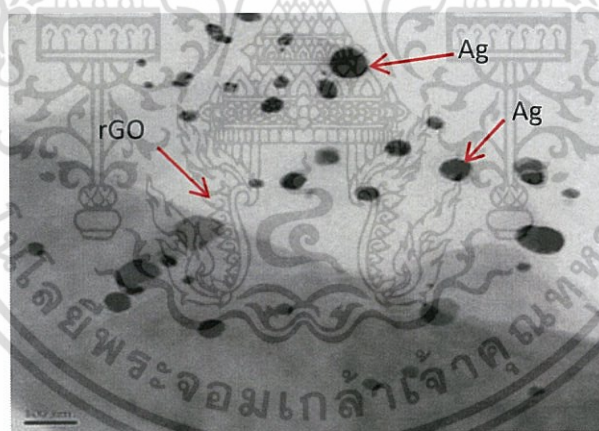
รูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง TEM ของ (a) กราฟีนออกไซด์ และ (b) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจากกล้อง TEM ของ (a) กราฟีนออกไซด์ แสดงให้เห็นรูปร่างมีลักษณะเป็นแผ่นมีความกว้างประมาณ 1500 นาโนเมตร และยาวประมาณ 2000 นาโนเมตร ส่วน (b) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นบางมีความกว้างประมาณ 660 นาโนเมตร และยาวประมาณ 830 นาโนเมตร ซึ่งมีความบางและขนาดเล็กกว่ากราฟีนออกไซด์ เนื่องจากใช้ไฮดราซีนในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีความรุนแรงสูง จึงทำลายพันธะในวงอะโรมาติกให้ขาดออกจากกัน ทำให้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีขนาดเล็กและบางลง



รูปที่ 4.26 แสดงภาพถ่าย a) TEM ของสารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์และ b) กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนซิลเวอร์

จากรูปที่ 4.26 ภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยเทคนิค TEM ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์หลังจากผ่านคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 180 วินาที โดยสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์เท่ากับ 3.9 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม และมีขนาดของอนุภาคที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 41.99 นาโนเมตร



รูปที่ 4.27 แสดงภาพถ่าย TEM สารละลายรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์

จากรูปที่ 4.27 ภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยเทคนิค TEM ของสารละลายรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยจากภาพแสดงให้เห็นถึงรูปร่างของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม และมีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์บนแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

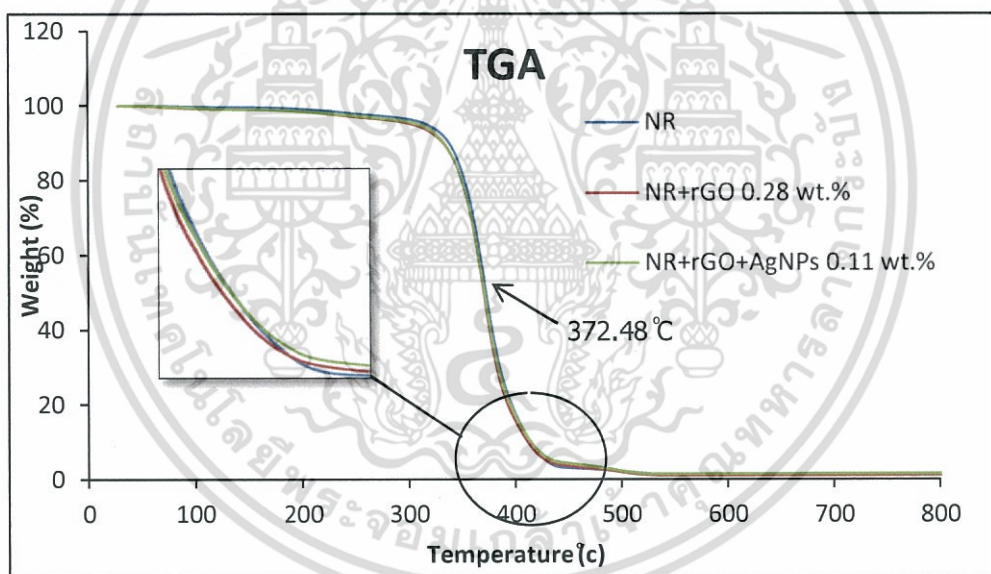
4.8 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อน

การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis : TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนจากการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง ซึ่งเทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือการระเหยของน้ำ การตกผลึก การแตกตัวของวัตถุ และปริมาณสารสัมพันธ์ เป็นต้น

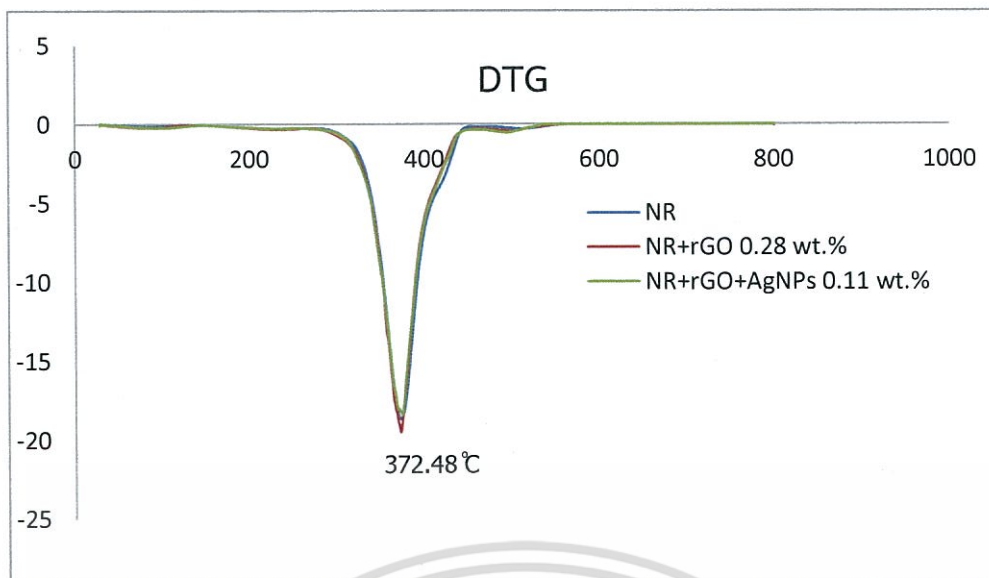
โดยใช้อุณหภูมิการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 0 ถึง 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งวิเคราะห์แผ่นยางธรรมชาติผสม 3 ชนิด คือ

- 1) แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure)
- 2) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%)
- 3) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.% ,AgNPs 0.11 wt.%)

ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.28 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นการสูญเสียน้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.29 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ DTG จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นการสูญเสียน้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก

ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าไม่ต่างกันมากนัก โดยแผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก เกิดการสลายตัวเร็วกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมเล็กน้อย ส่วนอุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์นั้นมีส่วนช่วยรักษาเสถียรระลอกทางความร้อนในพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากซิลเวอร์มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่อุณหภูมิ 960 องศาเซลเซียส [46] เมื่อเปรียบเทียบในช่วงอุณหภูมิที่สลายตัวของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม แผ่นยางธรรมชาติที่ผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก พบว่าทั้ง 3 ชนิดที่ศึกษามีอุณหภูมิการสลายตัวไม่ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวของทั้ง 3 ชนิดพบว่าแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมสูงกว่าแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก ส่วนเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ DTG แสดงให้เห็นการสูญเสียน้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค TGA ซึ่งตามลำดับดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นยางธรรมชาติผสมในรูปแบบต่างๆ

รูปแบบของแผ่นยางผสม	อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน (°C)	อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน (°C)	อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิไอโซพรีน (°C)
NR	238.05	508.37	372.48
NR+rGO 0.28 wt.%	234.38	498.82	372.48
NR+rGO 0.28 wt.% ,AgNPs 0.11 wt.%	244.00	492.95	372.48

4.9 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

ศึกษาสมบัติเชิงกล (Tensile testing) โดยทดสอบความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยแบ่งตามการเติมส่วนผสมดังต่อไปนี้

- 1) แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure)
- 2) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.10 wt.%)
- 3) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.19 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.19 wt.%)
- 4) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%)
- 5) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.01 wt.%)
- 6) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.03 wt.%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.05 wt.%)
- 8) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.11 wt.%)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการทดสอบสมบัติทางเชิงกลแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม

แผ่นยางธรรมชาติที่ ไม่มีสารตัวเติม (Natural rubber pure)	Stress to Maximum Load (Nmm)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)	Load at Break (N)
	1.22	0.18	0.90	10.27

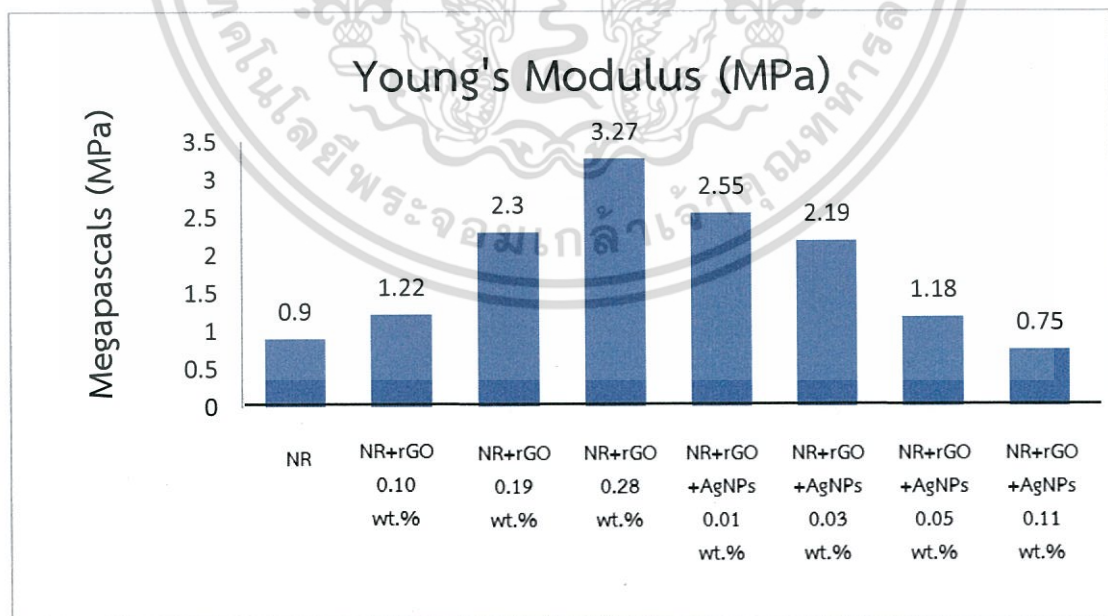
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการทดสอบสมบัติทางเชิงกลแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมและแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

รีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์ (wt.%)	Stress to Maximum Load (Nmm)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)	Load at Break (N)
0.10	2.05	0.24	1.22	16.25
0.19	3.62	0.41	2.30	19.56
0.28	6.29	0.47	3.27	27.49

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการทดสอบทางเชิงกลของแผ่นยางผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ

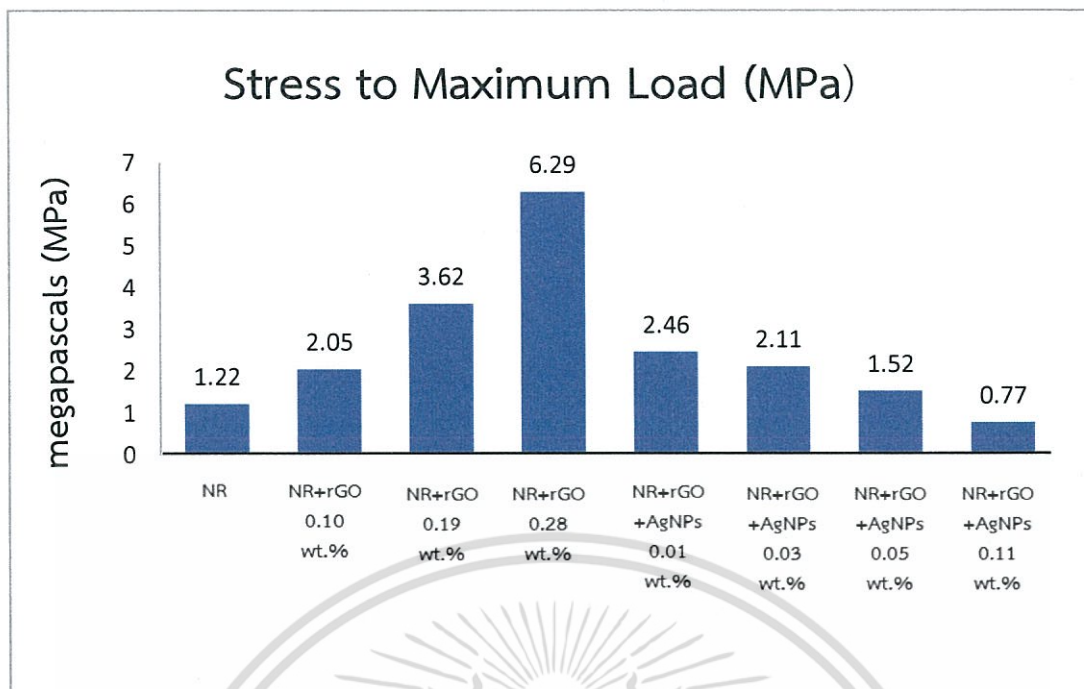
รีดิวซ์ กราฟีน ออกไซด์ (wt.%)	อนุภาคนาโน ซิลเวอร์ (wt.%)	Stress at Maximum Load (Nmm)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)	Load at Break (N)
0.28	0.01	2.46	0.45	2.55	20.42
0.28	0.03	2.11	0.34	2.19	18.85
0.28	0.05	1.52	0.26	1.18	17.49
0.28	0.11	0.77	0.22	0.75	12.25

จากการทดสอบแรงดึงเชิงกลของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ สามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม แผ่นยางธรรมชาติที่ผสมกราฟีนออกไซด์ แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่างๆ และแผ่นยางผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณต่างๆ แตกต่างกันดังนี้

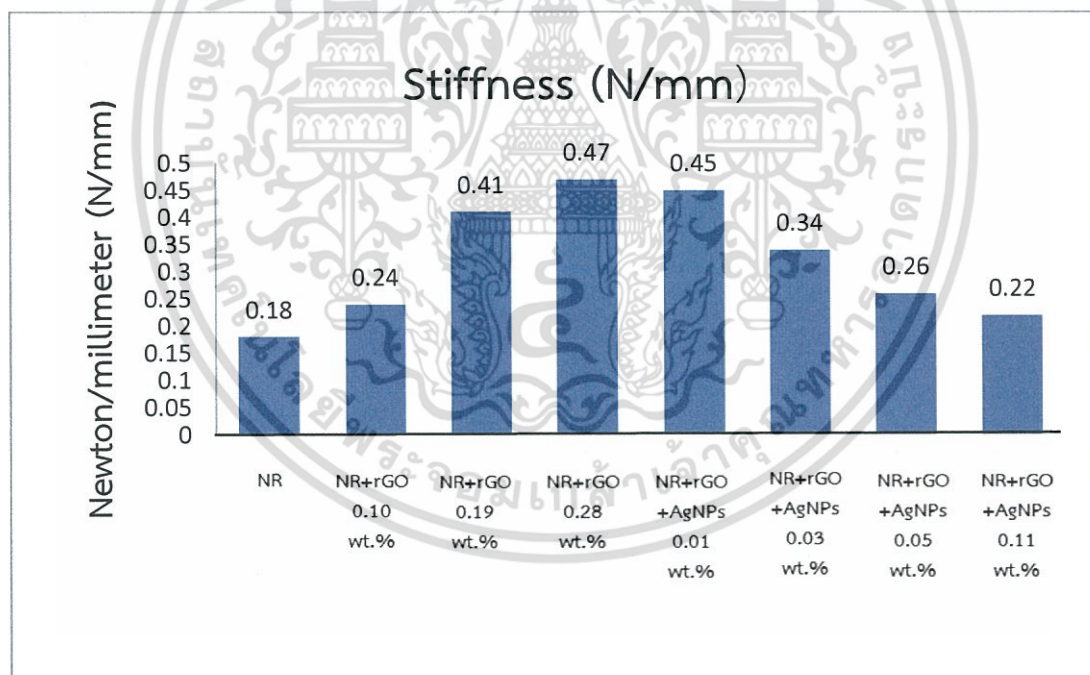


รูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบ Young's modulus ของแผ่นยางผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

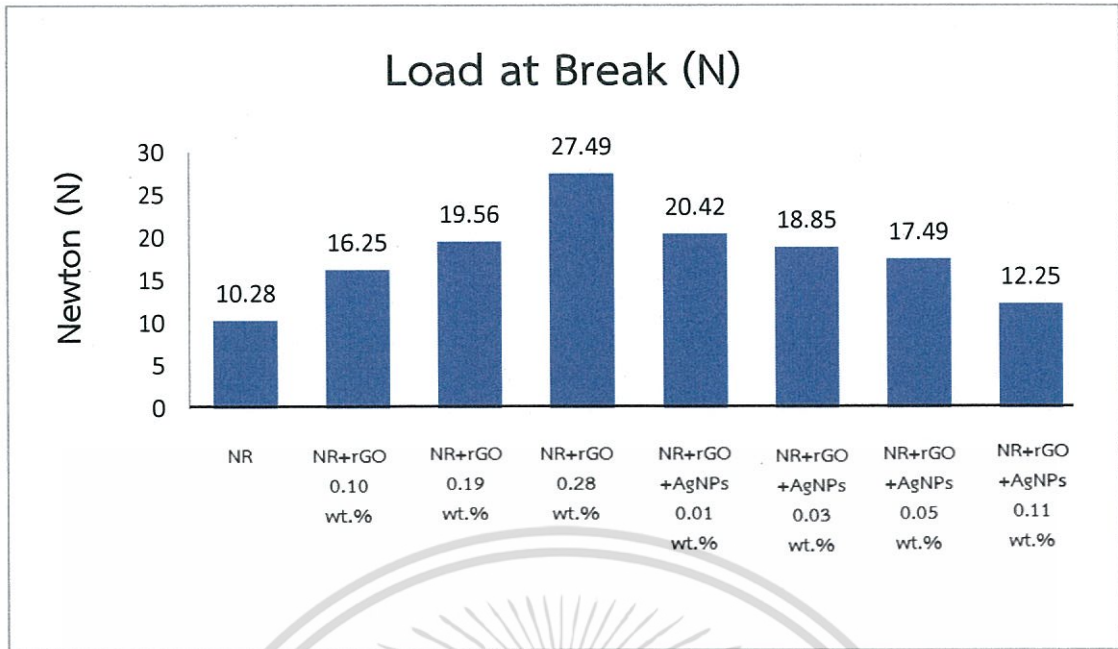


รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum ของแผ่นยางผสม

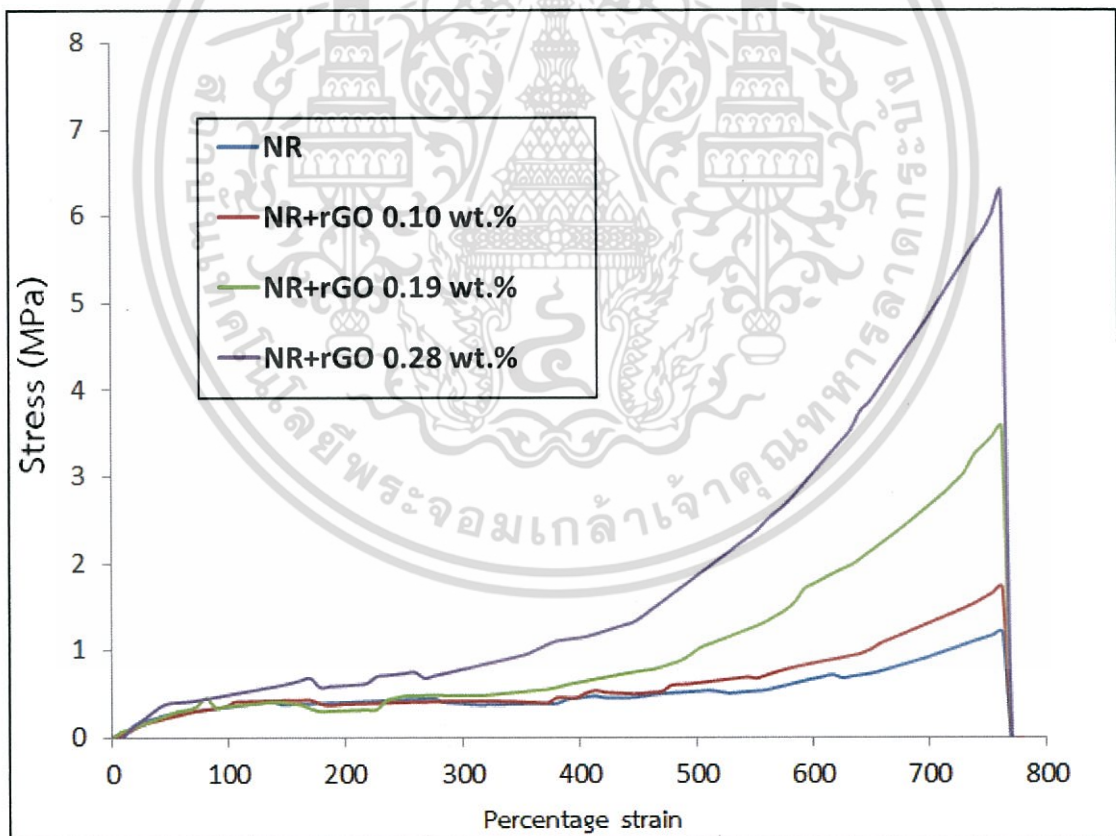


รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness ของแผ่นยางผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

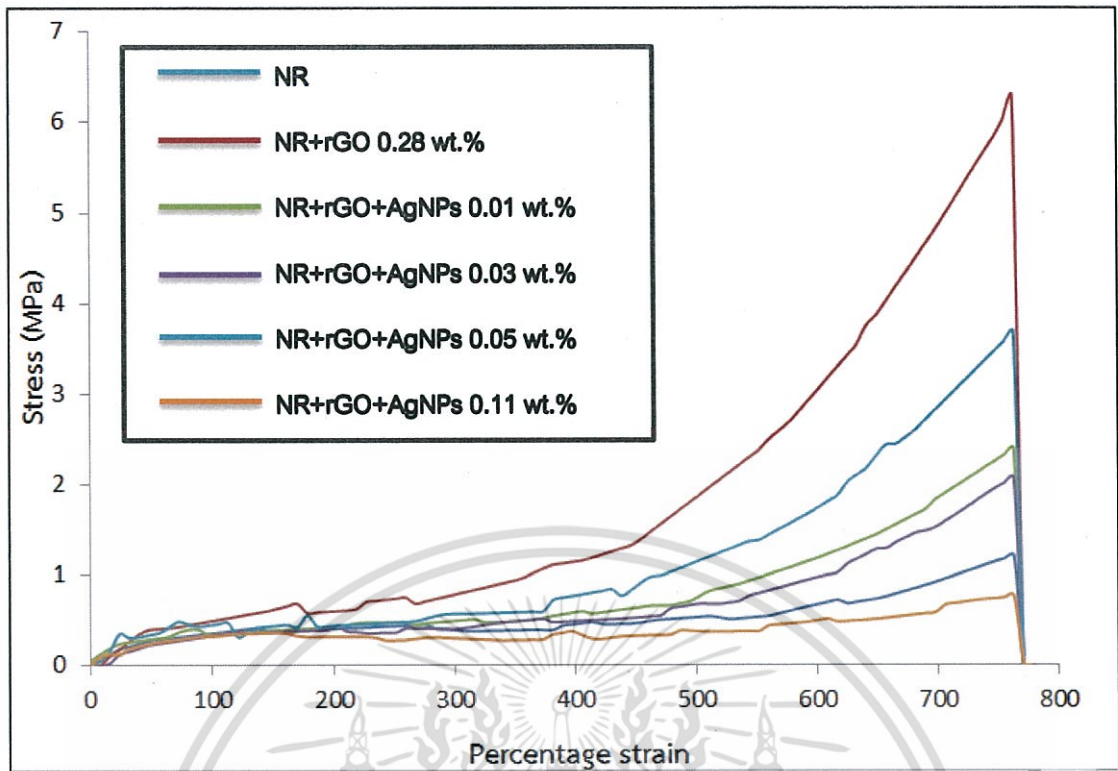


รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบ Load at Break ของแผ่นยางผสม



รูปที่ 4.34 แสดงตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม และยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 0.10 0.19 และ 0.28 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และแผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อเพิ่มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในแผ่นยางธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum lode) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) และค่าการคงรูป (Stiffness) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าร้อยละเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 263.33 % ในกรณีที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เท่ากับ 0.28 % โดยน้ำหนัก ส่วนแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum lode) ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และค่าการคงรูป (Stiffness) มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.6

จากรูปที่ 4.30 – 4.33 เมื่อเพิ่มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในแผ่นยางธรรมชาติในปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum lode) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) และค่าการคงรูป (Stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแผ่นยางธรรมชาติที่มีการผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถทนต่อแรงดึงได้สูงขึ้น ตามปริมาณของรีดิวซ์ กราฟีนที่เติมลงไป แต่ส่วนแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไปในนั้น เกิดการเสื่อมสภาพของแผ่นยางผสม พบว่าทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum lode) ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) ค่ามอดูลัสของ

ยัง (Young's Modulus) และค่าการคงรูป (Stiffness) มีค่าลดลง ดังนั้นแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สามารถแสดงให้เห็นว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นไปช่วยเสริมแรงแผ่นยางผสม

จากรูปที่ 4.34 คือการแสดงตัวอย่างกราฟ Tensile Strength ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 0.10 0.19 และ 0.28 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม จะพบว่ามีการเติมสารผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Stress ส่วน Percentage strain มีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใส่เข้าไป เพราะว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นจะเข้าไปเสริมสมบัติเชิงกลให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.35 ซึ่งเป็นการแสดงกราฟ Tensile Strength ของแผ่นยางผสมที่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละต่างๆ ได้แก่ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก โดยทำการเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีตัวเติมและยางธรรมชาติที่ผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Stress ส่วน Percentage strain มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เติมลงไป สาเหตุที่ค่าลดลงมาจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์นั้นได้เข้าไปทำลายโครงสร้างของยาง ทำให้สมบัติทางเชิงกลของแผ่นยางผสมนั้นลดลง ทำให้ดึงยึดได้น้อยและทำให้ขาดได้ง่าย

4.10 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ในการทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียทำการทดสอบโดยใช้วิธี Agar disc diffusion โดยใช้เชื้อแบคทีเรียในการทดสอบ 2 ชนิด ซึ่งได้แก่ เชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923 หรือ *S. aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*Escherichia coli* ATCC 25922 หรือ *E. coli*) โดยใช้แบคทีเรียทั้งหมดในการทดสอบจำนวน 1×10^8 cfu/g (Colony forming unit) ซึ่งวัดผลการทดสอบโดยการวัดรัศมีของโซนยับยั้ง (Inhibition Zone) ในหน่วยมิลลิเมตร (mm) โดยแผ่นยางธรรมชาติผสมที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียมีทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่

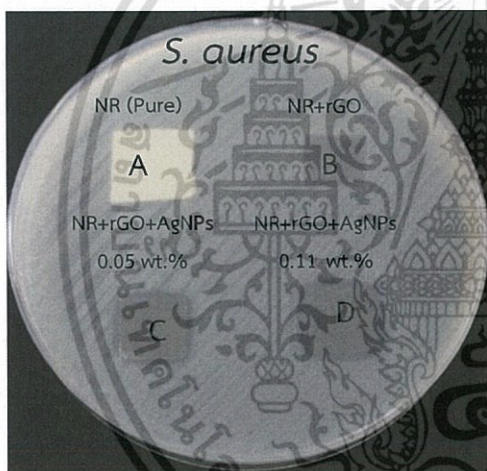
- 1) แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure)
- 2) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%)
- 3) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.01 wt.%)
- 4) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.03 wt.%)
- 5) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.05 wt.%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

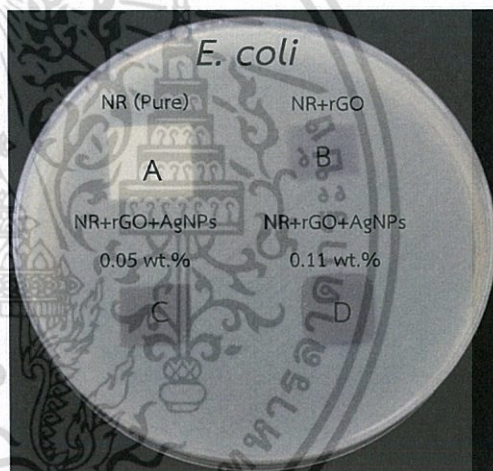
- 6) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.11 wt.%)

4.10.1 ประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรีย

จากการศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมด้วยวิธี Agar disc diffusion โดยใช้เชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) ซึ่งในเงื่อนไขการศึกษาที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย (A) ยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (B) แผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%) (C) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์อัตราคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.05 wt.%) (D) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก (NR, rGO 0.28 wt.%, AgNPs 0.11 wt.%) ซึ่งแสดงรัศมีของโซนยับยั้ง (Inhibition Zone) รูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36



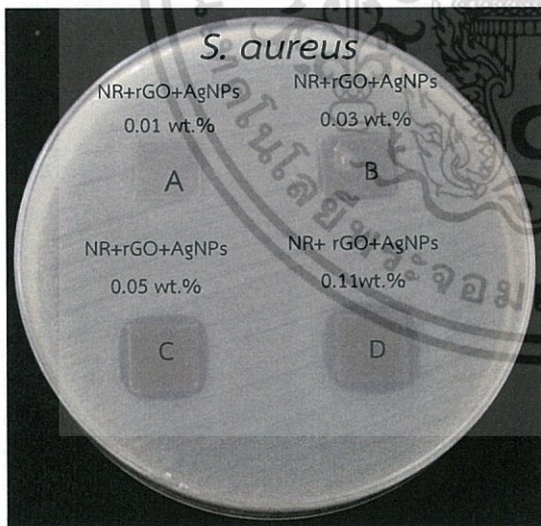
รูปที่ 4.37

รูปที่ 4.36 และ รูปที่ 4.37 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสม 4 ชนิด ได้แก่ (A) แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure) (B) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (NR, rGO 0.28 wt.%) (C) และ (D) แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

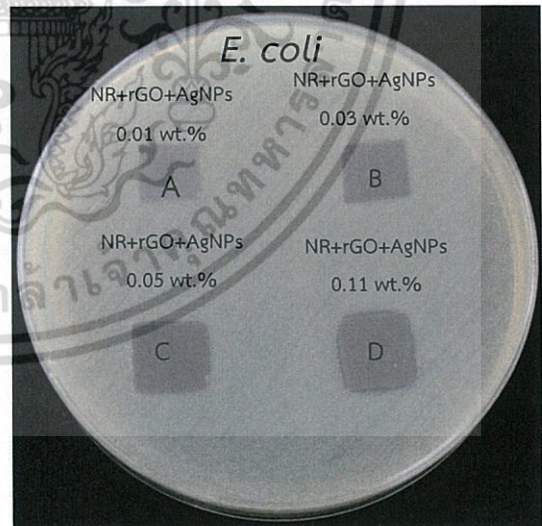
จากรูปที่ 4.36 แสดงการยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) เมื่อสังเกตผลของตัวอย่าง A คือ แผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม ไม่สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้ สังเกตจากรัศมีของโซนยับยั้งไม่ปรากฏ ตัวอย่าง B คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ ส่วนตัวอย่าง C คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่และมีอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งเช่นกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขึ้นซึ่งมีขนาด 1.6 มิลลิเมตร แสดงว่าสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้ ตัวอย่างสุดท้ายคือ D แผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งอย่างชัดเจนมีขนาดประมาณ 2.3 มิลลิเมตร ตัวอย่าง D จึงสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้ ต่อไปเป็นการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ รูปที่ 4.37 มีแนวโน้มผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับการยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งตัวอย่าง A และ B ไม่สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบได้ ตัวอย่าง C ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาด 0.1 มิลลิเมตร สามารถที่จะยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบได้ ส่วนตัวอย่าง D สามารถที่จะยับยั้งแบคทีเรียได้เพราะสังเกตจากการปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาด 0.6 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบในเรื่องนี้การศึกษาที่ 1 สรุปได้ว่าตัวอย่าง C และ D สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง 2 ชนิดและยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ

เรื่องการศึกษาที่ 2 ทำการศึกษาคผลของการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยมีแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) เหมือนกันทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย (A) เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก (B) เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก (C) เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก (D) เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก แสดงการยับยั้งแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด ดังรูปที่ 4.38 และ รูปที่ 4.39



รูปที่ 4.38



รูปที่ 4.39

รูปที่ 4.38 และ รูปที่ 4.39 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยใช้แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณซิลเวอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

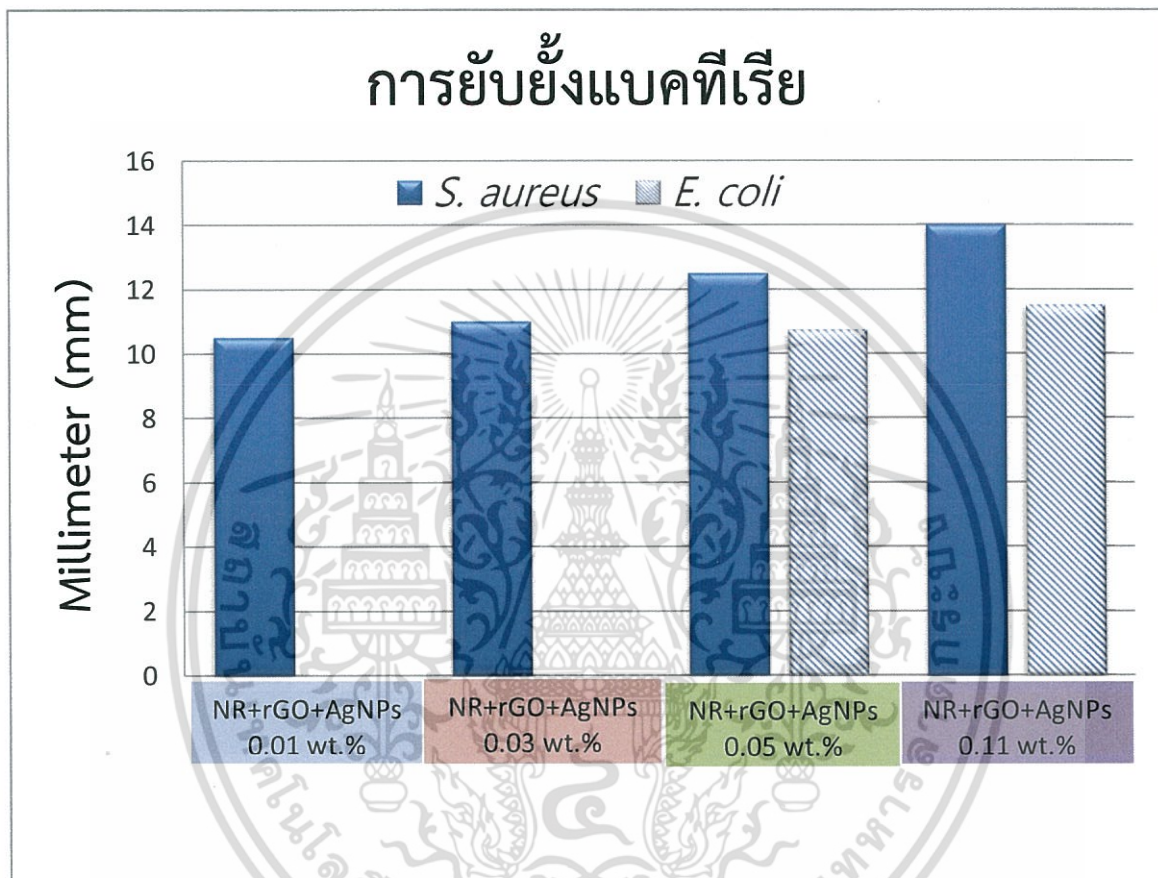
จากเงื่อนไขการศึกษาที่ 2 รูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นการยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) เมื่อสังเกตผลตัวอย่าง A คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาด 0.8 มิลลิเมตร จึงสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้เพราะ ตัวอย่าง B คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาด 1.0 มิลลิเมตร แสดงว่าสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้เช่นกัน ตัวอย่าง C คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาด 1.6 มิลลิเมตร แสดงว่าสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้เช่นกัน ส่วนตัวอย่าง D คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก เกิดการยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกอย่างเห็นได้ชัดที่สุด สังเกตจากรัศมีของโซนยับยั้งที่ปรากฏบริเวณกว้างขนาด 2.3 มิลลิเมตร เมื่อทำการศึกษาผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) รูปที่ 4.39 เมื่อสังเกตผลตัวอย่าง A คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้ง แสดงว่าไม่เกิดการยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบ ตัวอย่าง B คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ปริมาณร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงผลเช่นเดียวกับตัวอย่าง A เพราะไม่ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้ง จึงไม่สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบได้ ตัวอย่าง C คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้งขนาด 0.1 มิลลิเมตร แสดงว่าสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบได้ ส่วน D คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก ปรากฏรัศมีการยับยั้งอย่างเห็นได้ชัดที่สุดขนาด 0.6 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง A B และ C

จากเงื่อนไขที่ 2 แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบที่แตกต่างกันและจะมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ซึ่งแสดงข้อมูลดังรูป 4.38

จะเห็นว่าขนาดรัศมีของโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) นั้นมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งขนาดของรัศมีของโซนยับยั้งปรากฏบริเวณกว้างในเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) มากกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) เพราะว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกมี layer ชั้นเดียว ส่วนเชื้อแบคทีเรียแกรมลบมี lipid bilayer 2 ชั้น คือ outer membrane และ cytoplasmic membrane สารที่ใช้ในการยับยั้งแบคทีเรียคือ ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ซึ่งเข้าไปทำลายภายในเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกที่มี layer เพียงแค่ชั้นเดียวได้ง่ายกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบที่มี lipid bilayer ถึง 2 ชั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบสามารถทนต่ออนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ดีกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก [28]

จากการศึกษาพบว่าสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบ ได้ทั้งหมดเนื่องจากมาจากสารชนิดนี้ มีกลไกในการออกฤทธิ์ทำลายแบคทีเรียได้หลายแบบ จากการศึกษาของ Dakai [47] พบว่า มีกลไกอย่างน้อย 4 แบบที่สารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ออกฤทธิ์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าทำลายได้ คือ 1) การเข้าทำลายผนังเซลล์ 2) การเข้าทำลายนิวเคลียส 3) การสร้างความเป็นพิษในเซลล์ด้วยการสร้าง Release of Reactive Oxygen และ 4) การรบกวนกระบวนการสังเคราะห์สารภายในเซลล์ จากประสิทธิภาพดังกล่าว จึงทำให้สารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ มีความสามารถเข้าทำลายได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยอาจใช้กลไกที่แตกต่างกันในการยับยั้งแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด [47]



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ โดยแสดงการเปรียบเทียบในเงื่อนไขการศึกษาที่ 2 แผ่นยางธรรมชาติที่ผสมกับบริดจ์กราฟีนในปริมาณคงที่(ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ปริมาณร้อยละต่างๆ ได้แก่ 0.01 0.03 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ 0.01 และ 0.03 โดยน้ำหนัก พบรัศมีของโซนยับยั้งเกิดขึ้นที่เชื้อแบคทีเรียแกรมบวก แต่ไม่พบรัศมีของโซนยับยั้งที่แบคทีเรียแกรมลบ แสดงว่าปริมาณร้อยละ 0.01 และ 0.03 โดยน้ำหนัก สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ แต่ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบได้ ส่วนปริมาณร้อยละที่ 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก พบรัศมีของโซนยับยั้งทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ แสดงว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณร้อยละ 0.05 และ 0.11 โดยน้ำหนัก สามารถยับยั้งแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบได้ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบรัศมีของโซนยับยั้งของแบคทีเรียทั้งสอง พบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลศึกษาคุณลักษณะของสารตัวเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์

จากการศึกษาด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสง พบว่ากราฟีนออกไซด์มีพีคปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 230 นาโนเมตร ($\pi-\pi^*$) และ 300 นาโนเมตร ($n-\pi^*$) หลังจากนำกราฟีนออกไซด์มาทำการรีดิวซ์ พบว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เกิดการเลื่อนตำแหน่งของพีคจากตำแหน่งพีคที่มีความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร ไปในทิศทางที่มีความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นและในขณะเดียวกัน พีคที่มีความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร จะไม่ปรากฏให้เห็น แสดงให้เห็นว่ากราฟีนออกไซด์ถูกรีดิวซ์ให้เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ส่วนอนุภาคนาโนซิลเวอร์ หลังจากไมโครเวฟเป็นเวลา 180 วินาที จะพบพีคเอกลักษณ์การดูดกลืนแสงของซิลเวอร์ขนาดนาโนที่ตำแหน่งพีค 420 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการยืนยันการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์

จากการศึกษาด้วยเทคนิค FT-IR พบว่ากราฟีนออกไซด์มีแถบการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) อะโรมาติก (C=C) หมู่คาร์บอนิล (C=O) หมู่อีพอกซี (-C-O-C) หลังจากทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยไฮดราซีน พบว่าแถบการสั่นของ หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) หมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่อีพอกซี (-C-O-C-) ไม่ปรากฏให้เห็น เป็นการยืนยันว่าหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ได้ถูกกำจัดออกไป ในขณะเดียวกันยังคงปรากฏให้เห็นแถบการสั่นของอะโรมาติก (C=C) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

จากการศึกษาด้วยเทคนิครามาน พบว่าพีคสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มีอัตราส่วนค่าระหว่าง I_D/I_G มากกว่ากราฟีนออกไซด์ แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นระเบียบเนื่องจากขนาดของแผ่นกราฟีนที่มีขนาดเล็กลงจากการใช้ตัวรีดิวซ์ที่รุนแรง

จากการวิเคราะห์เทคนิค XRD พบว่ากราฟีนออกไซด์จะปรากฏพีคที่มุม เท่ากับ 26.44° ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบ คือ 0.34 นาโนเมตร กราฟีนออกไซด์ ปรากฏพีคเลื่อนไปที่มุม เท่ากับ 10.20° มีระยะห่างระหว่างระนาบ คือ 0.86 นาโนเมตร และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ปรากฏพีคเลื่อนไปที่มุมเท่ากับ 20.45° มีระยะห่างระหว่างระนาบ คือ 0.38 นาโนเมตร

จากการวิเคราะห์เทคนิค SEM พบว่าแผ่นกราฟไฟต์มีลักษณะซ้อนกันเป็นชั้นๆ และแผ่นหนากว่าลักษณะของแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่เป็นแผ่นเล็กกว่า ส่วนลักษณะแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะปั่นแผ่นบางกว่าซ้อนทับกันอยู่เป็นชั้นๆ

จากเทคนิควิเคราะห์เทคนิค TEM พบว่าลักษณะแผ่นกราฟีนออกไซด์มีความหนากว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ส่วนอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ผ่านการรีดิวซ์โดยใช้เวลา 180 วินาทีนั้น พบมีลักษณะทรงกลม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณอยู่ที่ 41.99 ± 22.55 nm ส่วนลักษณะสารแขวนลอยดรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เติมสารแขวนลอยดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ พบว่ามีอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลักษณะทรงกลมกระจายอยู่ทั่วบริเวณของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

5.1.2 สรุปผลคุณลักษณะแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโน ซิลเวอร์

จากการศึกษา FT-IR พบว่า แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และแผ่นยางธรรมชาติผสม รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ทุกๆปริมาณ จะไม่พบแถบการสั่นของกราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์บนแผ่นยางธรรมชาติ จะพบเฉพาะแถบการสั่นของยางธรรมชาติ เนื่องจากมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในอัตราส่วนที่น้อยมากๆ ส่วนเทคนิค XRD ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่งของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งจะพบเฉพาะพีคที่ตำแหน่งของยางธรรมชาติเริ่มต้นเท่านั้นซึ่งมีลักษณะกว้าง ในขณะที่แผ่นยางธรรมชาติที่ผสมกราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ จะพบพีคของอนุภาคนาโนซิลเวอร์เกิดขึ้นในยางธรรมชาติ โดยความสูงของพีคจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เติมลงไปมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ซึ่งลักษณะสัญญาณวิทยาบริเวณภาพตัดขวางของพื้นผิวยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/อนุภาคนาโนซิลเวอร์ จะมีรอยย่น ซึ่งเกิดจากการฝังตัวของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ขนาดนาโนในเนื้อยางธรรมชาติ ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติ

5.1.3 สรุปผลเชิงความร้อน สมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคนาโนซิลเวอร์

จากการวิเคราะห์เชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis หรือ TGA พบว่า เมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนและอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงในแผ่นยางธรรมชาติทุกปริมาณ ไม่สามารถทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาตินั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลความแข็งแรงดึง พบว่าเมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงแผ่นยางธรรมชาติทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด ค่ามอดูลัสของยัง ค่าแรงดึงที่จุดขาด และค่าการคงรูปมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรีดิวซ์กราฟีนที่เติมลงไปเพิ่มขึ้น ส่วนแผ่นยางธรรมชาติที่ผสม รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด ค่ามอดูลัสของยัง ค่าแรงดึงที่จุดขาด และค่าการคงรูปมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

จากการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย โดยใช้วิธี Argar disc diffusion จากผลการทดลองพบว่ากรยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกนั้นจะเริ่มเห็นการยับยั้งตั้งแต่ปริมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ส่วนแบคทีเรียแกรมลบนั้นจะเริ่มเห็นการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียตั้งแต่ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ซึ่งแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมรีดิวซ์กราฟีนที่ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด คือ *S. aureus* และ *E. coli* ได้อย่างดีที่สุดในสังเกตจากความกว้างรัศมีของโซนยับยั้งที่มีมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมรีดิวซ์กราฟีนที่ปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ส่วนแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมและแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก นั้นไม่ปรากฏรัศมีของโซนยับยั้ง แสดงว่าไม่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

จากการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียพบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด คือ *S. aureus* และ *E. coli* แต่ยังคงสมบัติเชิงกลที่ดี ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 เงื่อนไข

- เงื่อนไขที่ 1 ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* และยังคงสมบัติเชิงกลที่ดีคือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก
- เงื่อนไขที่ 2 ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และยังคงสมบัติเชิงกลที่ดีคือ แผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในขั้นตอนการเตรียมกราฟีนเพื่อทำการรีดิวซ์ การใช้ปริมาณของไฮดราซีนควรใช้ในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบอัตราส่วนกับปริมาณของกราฟีนออกไซด์และแอมโมเนีย เนื่องจากไฮดราซีนเป็นตัวรีดิวซ์ที่รุนแรงเมื่อทำการผสมกับแผ่นยางธรรมชาติอาจทำให้เกิดรูพรุนได้

2) ในขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยด้อนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโนโดยใช้วิธี Microwave method ระยะเวลาในการสังเคราะห์สารแขวนลอยด้อนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโนนั้นมีความผลต่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่ดี ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางผสม

3) ในขั้นตอนการเตรียมแผ่นยางผสม มีการปั่นกวนเพื่อช่วยในการผสมกันสารตัวเติมกับน้ำยางธรรมชาติ ควรใช้ความเร็วในการปั่นกวนที่เหมาะสมเพื่อลดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขณะผสม ซึ่งอาจทำให้เมื่อแผ่นยางผสมแห้งอาจเกิดฟองอากาศเกิดขึ้นซึ่งมีผลต่อสมบัติที่ต้องการ

4) ในการทดลองการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเปลี่ยนสารตั้งต้นกราฟไฟต์ที่เป็นคาร์บอนในรูปแบบอื่นที่มีราคาถูกลงและหาง่ายกว่า เช่น ถ่านชาร์โคล คาร์บอนด์แบล็ค เพื่อลดต้นทุนในการการผลิต

5) ในการทดลองต่อไป อาจจะใช้ปริมาณการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อเพิ่มสมบัติด้านเชิงกลให้ดียิ่งขึ้นกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Retrieved March 10, 2016. [Online]. Available: <http://www.bangkokbiznews.com/blog/detail/blog/detail/637159>
- [2] W. Xing, M. Tang, J. Wu, G. Huang, H. Li, Z. Lei, X. Fu, and H. Li. “Multifunctional properties of graphene/rubber nanocomposites fabricated by a modified latex compounding method”. *Composites Science and Technology* 99 (2014) 67 – 74.
- [3] Retrieved September , 2010. [Online]. Available: <http://kb2tmp.psu.ac.th/p suk b/bitstream/2010/6163/9/Chapter2.pdf>
- [4] Retrieved October , 2012. [Online]. Available: <http://rubberthai.com/yang/administrator/yang/administrator/jour/98%20อุตสาหกรรมยาง.pdf>
- [5] W.G.I.U.Rathnayake,H.Ismail, A.Baharin, A.G.N.D. Darsanasiri, Sanath Rajapakse “Synthesis and characterization of nano silver based natural rubber latex foam for imparting antibacterial and anti-fungal properties” *Polymer Testing* 31 (2012) 586-592
- [6] Retrieved September 2, 2014. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/cs5404061636216/khorng-ngan-wicay/khunsmbati-khxng-kaerfin-graphene>.
- [7] Retrieved august 12, 2012.[online]. Available: http://thep-center.org/src/article_edu_t.php?article_edu_id=7
- [8] Retrieved September 23, 2015.[Online]. Available: <https://www.rsu.ac.th/engineer/che/news/News%20Data/Silver.pdf>
- [9] วีระชัย แสงฉาย.2554. “สมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [10] K. Nawamawat ,J. T. Sakdapipanicha, Chee C. Ho, Y. Ma, J. Song.2011. “Surface nanostructure of Hevea brasiliensis natural rubber latex particles” *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 390 (2011) 157–166
- [11] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I.V., Dubonos, S. V. and Firsov, A. A. (2004). “Electric field effect in atomically thin carbon films”. *Science*, 306, 666.
- [12] Retrieved October 08, 2010.[online]. Available: <http://www.vcharkarn.com/varticle/41610>
- [13] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/cs5404061636216/khorng-ngan-wicay/khunsmbati-khxng-kaerfin-graphene>.
- [14] Choi, W. and Lee, J.-W. (2012). “Graphene Synthesis and Applications”. CRC Press Taylor & Francis Group. U.S. Ch. 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] Y. Zhang, J. P. Small, W. V. Pontius and P. Kim. 2005. "Fabrication and electric-Field Dependent Transport Measurement of Mesoscopic Graphite Devices." *Applied Physics Letters*. 86 : 1-3.
- [16] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva and A. A. Firsov. 2004. "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films". *Science*.06(5696) : 666-669.
- [17] Wei Gao, Lawrence B. Alemany, Lijie Ci & Pulickel M. Ajayan. 2009. "New insights into the structure and reduction of graphite oxide" *Nature Chemistry*1, 403-408
- [18] Retrieved June 14, 2017. [Online]. Aailable: [https://th.wikipedia.org/wiki/เงิน\(โลหะ\)](https://th.wikipedia.org/wiki/เงิน(โลหะ))
- [19] Retrieved December 4, 2012. [Online]. Aailable: <http://illumin.usc.edu/244/silver-nanoparticles-a-valuable-weapon-in-microbial-warfare/>
- [20] N.A. Ibrahim, B.M. Eid, H. El-Batal. 2012. "Novel approach for adding smart functionalities to cellulosic fabrics." *Carbohydrate Polymers*. 87: 744 -751.
- [21] D. Chunfa, Z. Xianglin, C. Hao and C. Chuanliang. 2016. "Sodium Alginate Mediated Route for the Synthesis of Monodisperse Silver Nanoparticles Using Glucose as Reducing Agents." *Rare Metal Materials and Engineering*. 45(2) : 0261-0266.
- [22] A. L. Garden, K. Scholz, D. R. Schwass and C. J. Meledandri. 2014. "Optimized colloidal chemistry for micelle-templated synthesis and assembly of silver nanocomposite materials." *Colloids and Surfaces. A*. 441 : 367– 377.
- [23] A. Hebeish, Th. I. Shaheen and M. E. EL-Naggar. 2016. "Solid state synthesis of starch-capped silver nanoparticles." *International Journal of Biological Macromolecules*. 87 : 70-76.
- [24] I. A. Wania, S. Khatoona, A. Gangulya, J. Ahmedb, A. K. Gangulib and T. Ahmada. 2010. "Silver nanoparticles: Large scale solvothermal synthesis and optical properties." *Materials Research Bulletin*. 45(8) : 1033-1038.
- [25] M. Noroozi, A. Zakaria, M. M. Moxsin, Z. A. Wahab and A. Abedini. 2012. "Green Formation of Spherical and Dendritic Silver Nanostructures under Microwave Irradiation without Reducing Agent." *International Journal of Molecular Sciences*. 13(7) : 8086-8096.
- [26] Retrieved September 14, 2015. [Online]. Aailable: <http://www.wikiwand.com/pt/พอลิไฟโลลิโดน>

- [27] W. Prasanseang, C. Sriwong, K. Choojun. 2017. “Effect of Synthesized Ag Nanoparticles by Using the Different Amounts of Polyvinylpyrrolidone For Ag-Natural Rubber Hybrid Sheets and Their Antibacterial Properties” Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
- [28] ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ. 2554. “การพัฒนาวัสดุยางธรรมชาติ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย สำหรับการประยุกต์ใช้งานในผลิตภัณฑ์ด้านอนามัย.” รายงานวิจัย คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [29] Retrieved September 4, 2013. [Online]. Available: <http://cienciasdejoseleg.blogspot.com/2013/11/division-instantanea-en-procariotas.html>
- [30] สภาพร พรหมศร. 2555. “การเตรียมนาโนคอมพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับอนุภาคนาโนอินทรีย์และอนินทรีย์” วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเคมีนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [31] Retrieved August 31, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/Publication/265170648_Antimicrobial_activity_of_the_metals_and_metal_oxide_Nanoparticles
- [32] D.C. Stanier a, A.J. Patil b, C. Sriwong b, S.S. Rahatekar a, J. Ciambella “The reinforcement effect of exfoliated graphene oxide nanoplatelet on the mechanical and viscoelastic properties of natural rubber” Composites Science and Technology 95 (2014) 59–66
- [33] N. Yan, G. Buonocore, M. Lavorgna, S. Kaciulis, S. K. Balijepalli, Y. Zhan, H. Xia, and L. Ambrosio. “The role of reduced graphene oxide on chemical, mechanical and barrier properties of natural rubber composites”. Composites Science and Technology 102 (2014) 74 – 81
- [34] S. Yaragalla, A.P. Meera, N. Kalarikkal, S. Thomas. “Chemistry associated with natural rubber-graphene nanocomposites and its effect on physical and structural properties” Industrial Crops and Products 74 (2015) 792–802
- [35] Dan li, Marc B. Muller, Scott Gilje, Richard B. Kaner and Gordon G. Wallace “Processable aqueous dispersion of graphene nanosheets” Nature nanotechnology vol. 3 February 2008
- [36] H. Wang, X. Qiao, J. Chen, X. Wang, S. Ding. “Mechanisms of PVP in the Preparation of silver nanoparticles” Materials Chemistry and Physics 94 (2005) 449–453

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] D. Li, M. B. Müller, S. Gilje, R. B. Kaner, and G. G. Wallace. 2008. "Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets." *Nature Nanotechnology*.3 : 101–105.
- [38] G. Sun, X. Li, Y. Qu, X. Wang, H. Yan and Y. Zhang. 2008. "Preparation and characterization of graphite nanosheets from detonation technique." *Materials Letters*. 62 : 703–706.
- [39] N. H. H. A. Bakar, J. Ismail and M. A. Bakar. 2007. "Synthesis and characterization of silver nanoparticles in natural rubber." *Materials Chemistry and Physics*. 104 : 276-283.
- [40] P. K. Khanna, N. Singh, S. Charan, V. V. V. S. Subbarao, R. Gokhale and U. P. Mulik. 2005. "Synthesis and characterization of Ag/PVA nanocomposite by chemical reduction method." *Materials Chemistry and Physics*. 93 : 117–121.
- [41] P. Phanjom, G. Ahmed. 2015. "Biosynthesis of Silver Nanoparticles by *Aspergillus oryzae* (MTCC No. 1846) and Its Characterizations." *Nanoscience and Nanotechnology*. 5(1) : 14-21.
- [42] H. Itoigawa, T. Kamiyama and Y. Nakamura. 1997. "Ag precipitation and optical behavior in Na₂O-B₂O₃ glasses." *Journal of Non-Crystalline Solids*. 220 : 210– 216.
- [43] J. Zhua, X. Liaoa and H. Chena. 2001. "Electrochemical preparation of silver dendrites in the presence of DNA." *Materials Research Bulletin*. 36 : 1687– 1692.
- [44] M. Zhenga, M. Gua, Y. Jina and G Jina. 2001. "Optical properties of silver-dispersed PVP thin film." *Materials Research Bulletin*. 36 : 853-859.
- [45] Retrieved August 16, 2014. [Online]. Aailable: https://www.researchgate.net/publication/265170648_Antimicrobial_activity_of_the_metals_and_metal_oxide_nanoparticles
- [46] M. K. Shukla, R. P. Singh, C.R.K. Reddy, Bhavanath Jha. 2012. "Synthesis and characterization of agar-based silver nanoparticles and nanocomposite film with antibacterial applications." *Bioresource Technology*.(107) :295-300.
- [47] Tikam Chand, Anu Kumar, Rita S. Majumder and Vinod Yadav. 2016. "Mechanistic Basis of Antimicrobial Actions of Silver Nanoparticles" *Frontiers in Microbiology* :1 - 17



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การหาค่าร้อยละโดยมวลของตัวถูกละลาย

$$\text{สูตร ร้อยละโดยมวล} = \frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของสายละลาย}} \times 100$$

ตัวอย่าง การหาค่าร้อยละโดยมวลของปริมาตรการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 2 ml (ตัวอย่างแผ่นยางผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 0.10 wt.%)

จากความเข้มข้นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เท่ากับ 1.8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อใช้ปริมาตร (rGO) เท่ากับ 2 ml = $2 \times 1.8 \text{ mg/ml} = 3.6 \text{ มิลลิกรัม}$

การคิดร้อยละโดยมวล โดยใช้น้ำหนักของยางแห้งเท่ากับ 3.7154 กรัม

$$\text{ดังนั้นจะได้ wt.\%} = \frac{3.8 \times 10^{-3} \text{ g}}{3.7154 \text{ g} \times 3.6 \times 10^{-3} \text{ g}} \times 100$$

$$= 0.0968 \text{ หรือ } 0.10 \text{ wt.\%}$$

ตัวอย่าง การหาค่าร้อยละโดยมวลของปริมาตรการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร (ตัวอย่างแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่ 0.28 wt % และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร้อยละ 0.01 wt.%)

จากความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์เท่ากับ 3.9 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อใช้ปริมาตรสารแขวนลอยนาโนซิลเวอร์เท่ากับ 0.1 ml = $0.1 \times 3.9 \text{ mg/ml} = 0.59 \text{ มิลลิกรัม}$

การคิดร้อยละโดยมวล โดยใช้น้ำหนักของยางแห้งเท่ากับ 3.7154 กรัม และน้ำหนักของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เท่ากับ $10.8 \times 10^{-3} \text{ กรัม}$

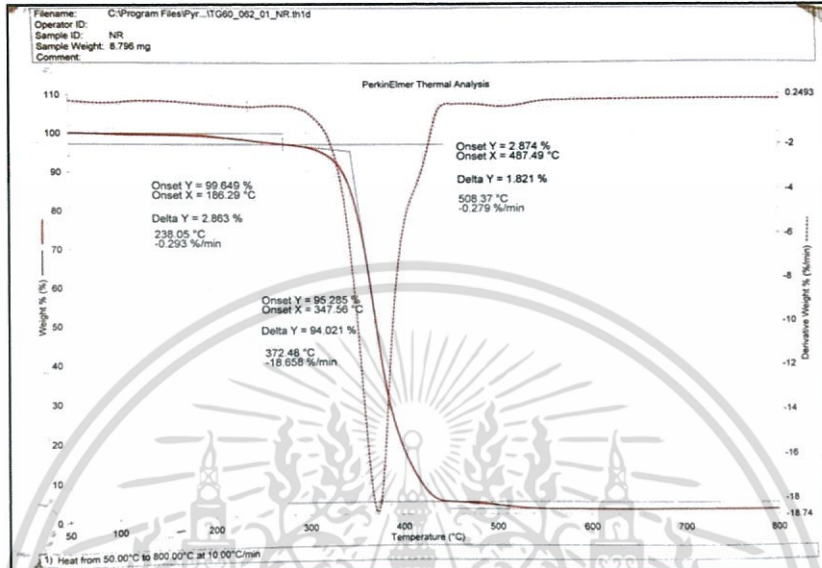
$$\text{ดังนั้นจะได้ wt.\%} = \frac{0.59 \times 10^{-3} \text{ g}}{3.7154 \text{ g} + 10.8 \times 10^{-3} \text{ g} + 0.59 \times 10^{-3} \text{ g}} \times 100$$

$$= 0.01 \text{ wt.\%}$$

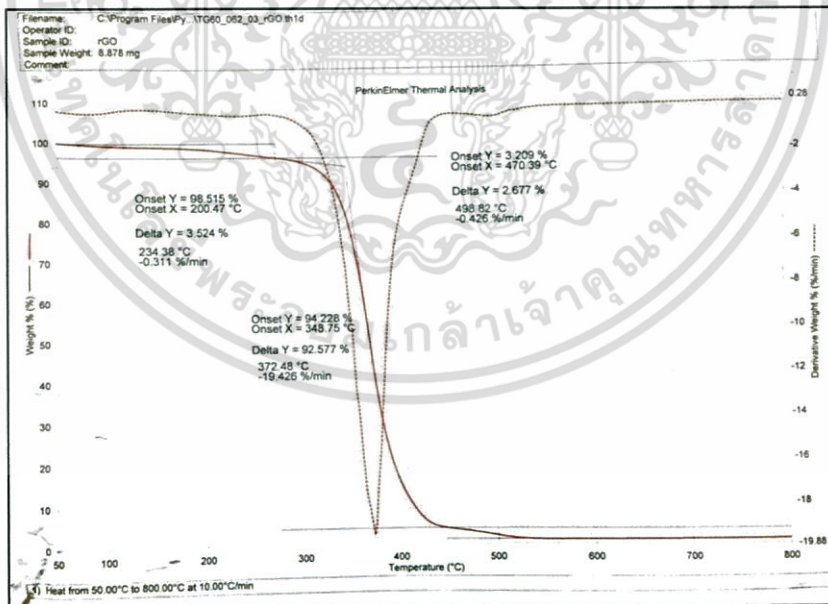
ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์เอกลักษณ์

1. การวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis

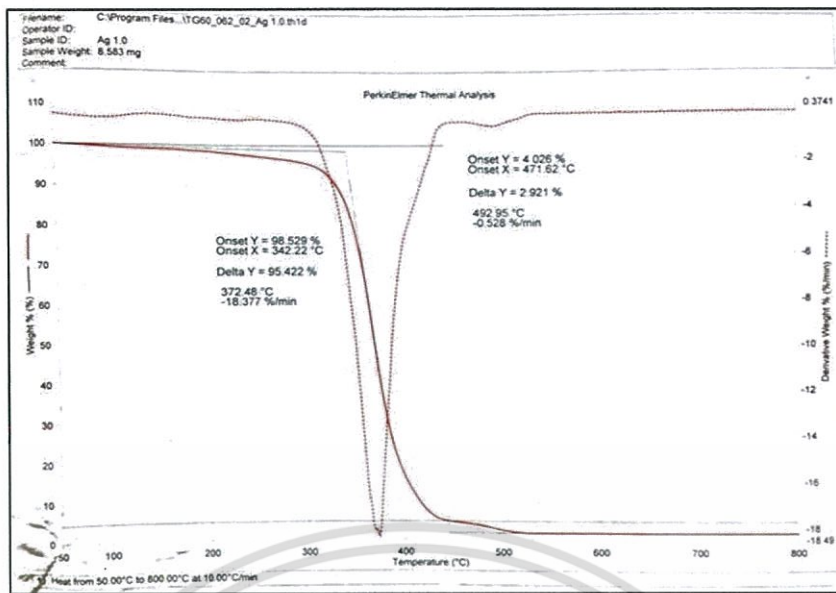


รูปที่ 1 กราฟแสดงการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ



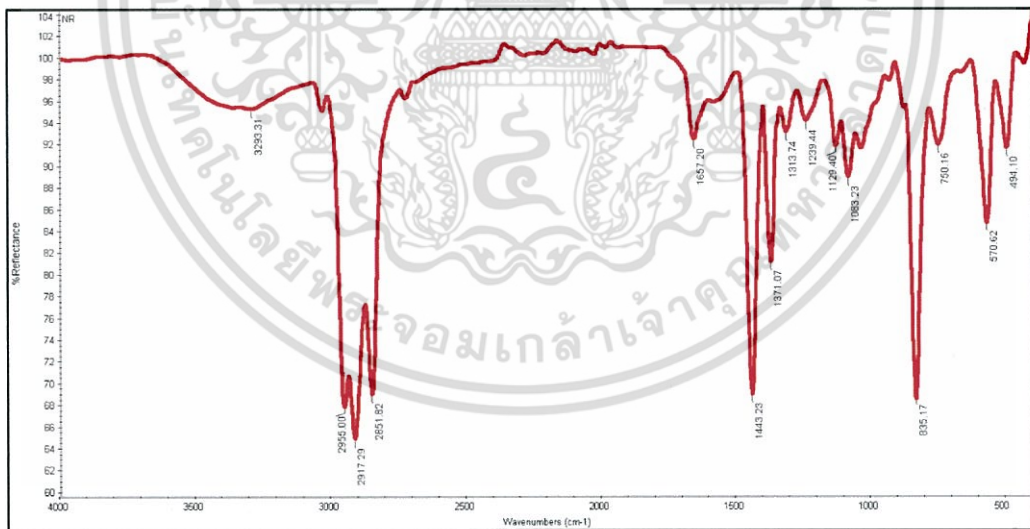
รูปที่ 2 กราฟแสดงการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสมกับบรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



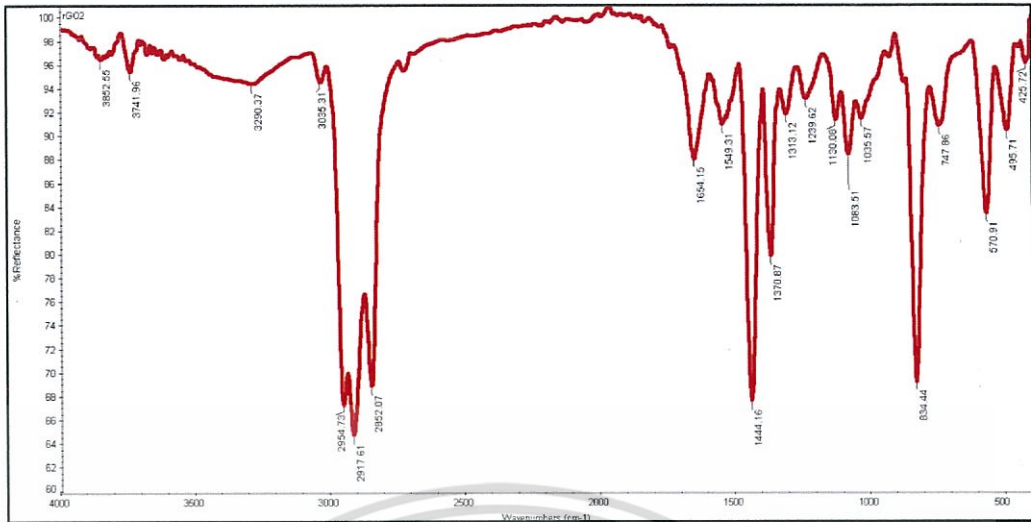
รูปที่ 3 กราฟแสดงการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติผสมกับกราฟีนออกไซด์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ร้อยละ 0.11 wt.%

2.การวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นโมเลกุลของสาร (FT-IR)

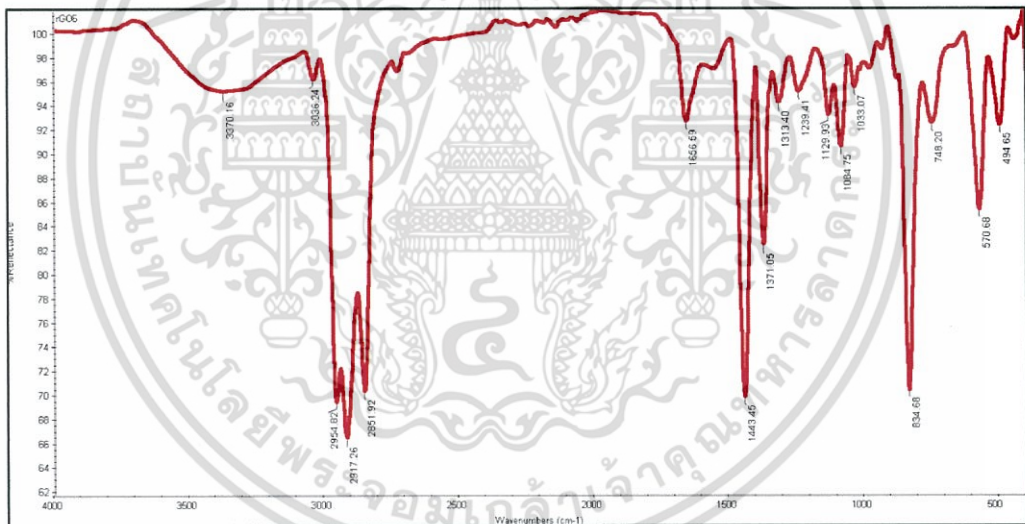


รูปที่ 4 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

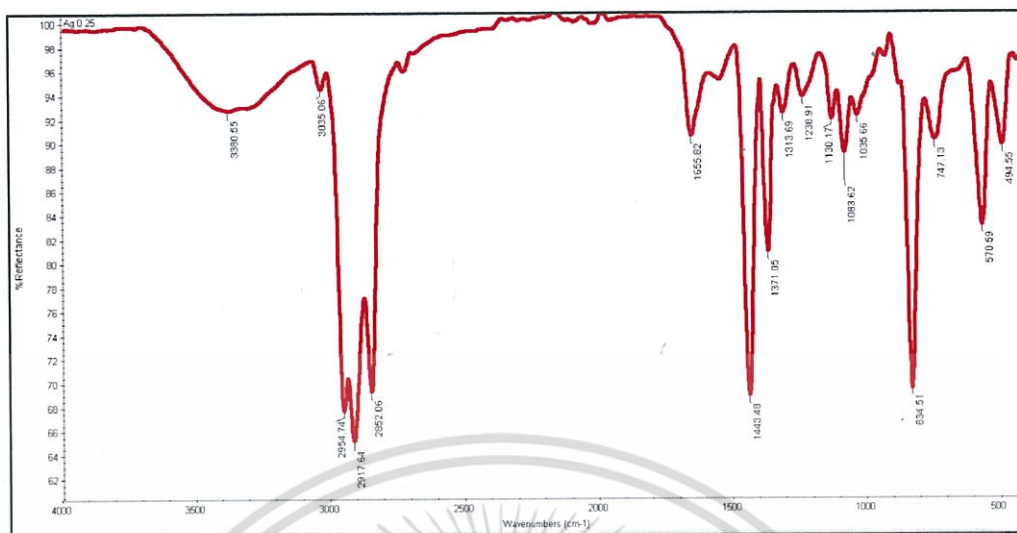


รูปที่ 5 กราฟ FT-IR รีติวซ์กราฟีนปริมาณร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนัก

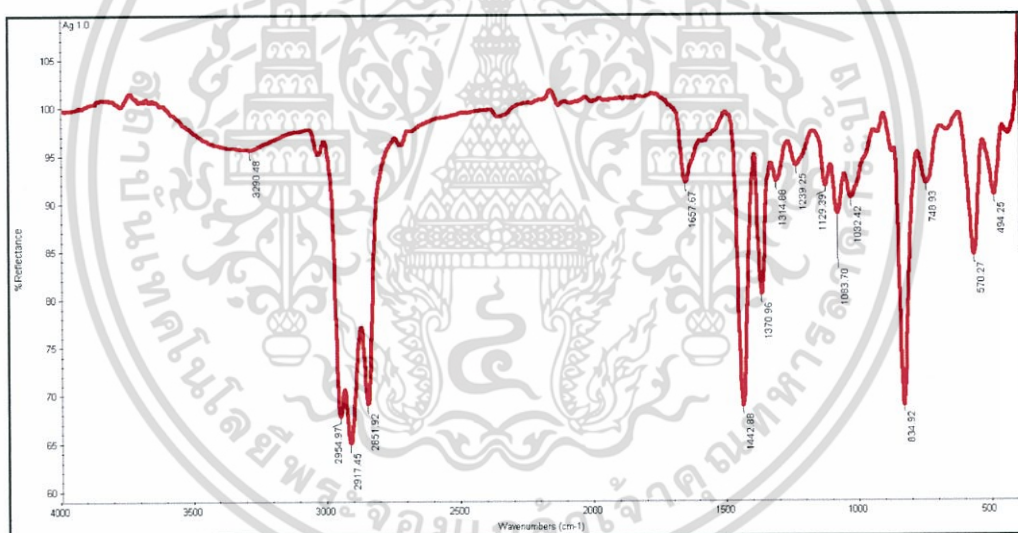


รูปที่ 6 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีติวซ์กราฟีนปริมาณร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 8 กราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก) และมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

