

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของแผ่น
ยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์และกราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND ANTIBACTERIAL
PROPERTIES OF GO/AgNPs/NATURAL RUBBER COMPOSITE SHEETS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี (เคมีอินทรีย์)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-012-038

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของแผ่น
ยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์และกราฟีนออกไซด์

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND ANTIBACTERIAL
PROPERTIES OF GO/AgNPs/NATURAL RUBBER COMPOSITE SHEETS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี (เคมีอินทรีย์)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-012-038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND ANTIBACTERIAL
PROPERTIES OF GO/AgNPs/NATURAL RUBBER COMPOSITE SHEETS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY (INORGANIC CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2017-SC-M-012-038



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสม
อนุภาคนาโนซิลเวอร์และกราฟีนออกไซด์”
“PREPARATION, CHARACTERIZATION AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF
GO/AgNPs/NATURAL RUBBER COMPOSITE SHEETS”

ชื่อนักศึกษา นายวรท ประสานเสียง
รหัสประจำตัว 57605034
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมี)
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวิตา สุวรรณสวัสดิ์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ พุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ.2560 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 302 อาคารพระจอมเกล้า

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คชณี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 20 เดือน AA พ.ศ. 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์และกราฟีนออกไซด์
ชื่อนักศึกษา	นายวรท ประสานเสียง
รหัสประจำตัว	57605034
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมีอินทรีย์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

บทคัดย่อ

เพื่อเป็นการพัฒนาสมบัติในการใช้งานที่หลากหลายของยางธรรมชาติ (NR) เช่น สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสมบัติทางเชิงกล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร (AgNPs) กราฟีนออกไซด์ (GO) แผ่นของผสมยางธรรมชาติกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน (NR/AgNPs) และแผ่นของผสมยางธรรมชาติกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ (NR/AgNPs/GO) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาศสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย สมบัติทางเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เตรียมได้อีกด้วย ในส่วนของการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนถูกสังเคราะห์ขึ้นมาก่อนโดยสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็ว และปลอดภัย โดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ที่มีความสามารถเป็นทั้งสารให้อิเล็กตรอน (Reducing agent) และสารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizing agent) ให้กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ขณะที่สารกราฟีนออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการดัดแปลงของฮัมเมอร์ (Hummer's method) จากการใช้ผงกราไฟต์ (Graphite) เป็นสารตั้งต้น ในส่วนของแผ่นของผสมยางธรรมชาติสามารถเตรียมได้จากกระบวนการผสมและขึ้นรูปโดยตรงแบบลาเท็กซ์ (Latex mixing and casting) โดยใช้น้ำยางธรรมชาติ (60% HA) ผสมโดยตรงกับสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน กราฟีนออกไซด์ และสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน กราฟีนออกไซด์ ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน กราฟีนออกไซด์ และแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ เทคนิคการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible) เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เทคนิคการตรวจสอบโครงสร้างของสารโดยการวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (ATR-FTIR) เทคนิคการตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เทคนิคการตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิครามาน (Raman) เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิคการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบ (EDX) เป็นต้น ซึ่งลักษณะของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถยืนยันได้เป็นอย่างดีจากการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ขณะที่เทคนิคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านสามารถยืนยันลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในลักษณะคล้ายทรงกลม (Spherical-like) และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 29.7 ถึง 90.4 นาโนเมตร โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ ในส่วนของโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของแผ่นของผสมยางธรรมชาติจะมีค่าสอดคล้องกับยางธรรมชาติที่ใช้ผสมตั้งต้น และจากการตรวจสอบทางสัณฐานพื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ พบว่าภายในเนื้อของแผ่นของผสมยางธรรมชาติจะมีพื้นผิวที่ขรุขระเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการฝังตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในเนื้อยางธรรมชาติ ในขณะที่การตรวจสอบธาตุองค์ประกอบยืนยันได้ว่าสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อยางธรรมชาติ จากผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นของผสมยางธรรมชาติพบว่า สมบัติทางเชิงกลในด้านความเค้นที่โหลดสูงสุด (Stress at maximum load) ค่ารับโหลดก่อนขาด (Load at break) ค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) และค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ (NR/GO) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ แต่ในแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบอยู่จะมีค่าสมบัติทางเชิงกลลดลงอย่างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของเนื้อยางสามารถถูกทำลายด้วยซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) และในส่วนของทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ ได้มีการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *Staphylococcus aureus* (แกรมบวก) และ *Escherichia coli* (แกรมลบ) พบว่าทั้งแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่ผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน (NR/AgNPs) และแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่ผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนและกราฟีนออกไซด์ (NR/AgNPs/GO) จะมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีบริเวณการยับยั้งเชื้อ (Inhibition zone) ที่เห็นได้ชัดเจน และจะพบบริเวณโซนการยับยั้งเพิ่มขึ้นเมื่อผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากผลของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้ในการสังเคราะห์ และยิ่งขึ้นกับปริมาณของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ที่ถูกเติมลงไปมากขึ้น ดังนั้นจากผลการวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอมาข้างต้น จะสามารถเป็นประโยชน์ในด้านการเพิ่มมูลค่า และความหลากหลายของการใช้น้ำยางธรรมชาติ หรือแผ่นยางธรรมชาติได้

คำสำคัญ : กระบวนการผสมแบบลาเท็กซ์ กระบวนการทางไมโครเวฟ กราฟีนออกไซด์ การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย แผ่นยางธรรมชาติ อนุภาคซิลเวอร์นาโน

Thesis Title	Preparation, Characterization and Antibacterial Properties of GO/AgNPs/Natural Rubber Composite Sheets
Student Name	Mr. Warot Prasanseang
Student ID	57605034
Degree	Master of Science (Inorganic Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2017
Thesis Advisor	Dr. Chaval Sriwong

Abstract

To develop the functional properties of natural rubber (NR) such as antibacterial and mechanical properties, thus, in this research investigated the preparation and characterization of silver nanoparticles (AgNPs), graphene oxide (GO) and NR incorporated with AgNPs and GO, respectively. Moreover, the antibacterial, mechanical and thermal properties of the obtained NR composite sheets were also studied. In the preparation procedure, the colloidal AgNPs were firstly synthesized by a simple, rapid and green microwave-assisted method using polyvinylpyrrolidone (PVP) as a reducing and stabilizing agent. The effect of PVP weight ratios towards the sizes of AgNPs was also investigated. While the aqueous suspension of GO was synthesized by a modified Hummer's method from graphite as a starting material. Then, the NR composite sheets were easily prepared by directly latex mixing-casting method using natural rubber latex (60% HA) with the synthesized AgNPs (NR/AgNPs), GO (NR/GO) and GO mixed with AgNPs (NR/AgNPs/GO) suspensions, respectively. After that, the obtained AgNPs colloids, GO and all the 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 (EDX), transmission electron microscopy (TEM), universal testing machine (UTM) and thermo-gravimetric analysis (TGA) techniques. From the UV-vis results, the characteristic absorption peaks of the synthesized AgNPs and GO could be observed and well-confirmed, whereas the TEM technique showed that the average particles size of the colloidal AgNPs were increased from 29.7 to 90.4 nm upon increasing PVP contents, which the particle sizes of all the synthesized AgNPs had spherical-like shapes. The crystalline phases and functional groups of all the NR composite sheets are corresponding to pristine natural rubber.

From the SEM and EDS results, the surface morphologies of the NR/AgNPs and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NR/AgNPs/GO composite sheets were roughness surface by impregnating of AgNPs and GO into the NR sheets, while the AgNPs could be well dispersed on the matrix of NR sheet. Form the tensile test indicated that the mechanical properties (young's modulus, stiffness and load at break) of the NR+GO composite sheets were increased with increasing amounts of GO loading, but in the NR/AgNPs and NR/AgNPs/GO sheets were decreased. The reduction on the mechanical properties of NR sheets incorporated with AgNPs may be due to the fact that it destroys the rubber matrix of these composites by Ag⁺. Moreover, the antibacterial properties of all the obtained NR composite sheets were also tested using Agar disc diffusion method against Gram-positive *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) and Gram-Negative *Escherichia coli* (*E. coli*). The results showed that both NR/AgNPs and NR/AgNPs/GO composite sheets exhibited excellent antibacterial properties against these bacteria, in which the zones of inhibition were also dependent on the synthesized AgNPs by utilizing the different amounts of PVP, and which increasing the amounts of both AgNPs and GO mixed with AgNPs loading. From all above, therefore, 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 : Latex mixing-casting method, Microwave-assisted method, Graphene oxide, Antibacterial properties, Natural rubber, Silver nanoparticles

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูงทั้งที่ออกนามและมีได้ออกนามที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือให้โครงการวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมี ที่ได้ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการสอบโครงการวิทยานิพนธ์ ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ และอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวิดา สุวรรณชวลิต ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบโครงการวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และให้กำลังใจ ทำให้การทำโครงการพิเศษลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนมาจนสำเร็จการศึกษา

วรท ประสานเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ยางธรรมชาติ.....	4
2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ.....	4
2.1.2 น้ำยางข้น.....	6
2.1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	6
2.1.4 การพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติ.....	7
2.2 ซิลเวอร์.....	8
2.2.1 อนุภาคนาโนซิลเวอร์.....	9
2.2.2 เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์.....	10
2.2.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์.....	11
2.2.3.1 วิธีการสังเคราะห์ทางกายภาพ.....	11
2.2.3.2 วิธีการสังเคราะห์ทางเคมี.....	12
2.2.3.3 วิธีการสังเคราะห์ทางชีวภาพ.....	15
2.2.4 การประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนซิลเวอร์.....	16
2.3 เทคนิคทางไมโครเวฟ.....	17
2.3.1 ข้อดีในการใช้เทคนิคทางไมโครเวฟในการสังเคราะห์.....	18
2.3.2 การใช้เทคนิคไมโครเวฟในการสังเคราะห์สารอนุภาคระดับนาโน.....	19
2.4 พอลิไวเนลไพโรลิโดน.....	20
2.4.1 ข้อดีและการนำไปใช้งานของพอลิไวเนลไพโรลิโดน.....	20
2.4.2 การใช้พอลิไวเนลไพโรลิโดนในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์.....	21
2.5 กราฟีนออกไซด์.....	22
2.5.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 สมบัติของกราฟีนออกไซด์.....	24
2.6 เชื้อแบคทีเรีย	26
2.6.1 องค์ประกอบของแบคทีเรีย	26
2.6.2 กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์	28
2.6.3 กลไกการต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์/โลหะนาโนคอมโพสิต	29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 สารเคมี.....	33
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	34
3.3.1 การศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโน.....	34
3.3.1.1 การศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์สารซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโน.....	34
3.3.1.2 ศึกษาผลของปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	36
3.3.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน	36
3.3.2.1 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่แตกต่างกัน	36
3.3.2.2 ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน	37
3.3.3 ศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนและกราฟีนออกไซด์.....	39
3.3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการดัดแปลงของฮูเมอร์	39
3.3.3.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์	40
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์.....	40
3.4.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer).....	40
3.4.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)	40
3.4.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Attenuated Reflection Fourier-transform infrared spectroscopy; ATR-FTIR).....	41
3.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM).....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM).....	41
3.4.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX)	42
3.4.7 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy).....	42
3.4.8 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	42
3.4.9 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)	43
3.4.10 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-Bacterial test).....	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	44
4.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และการพิสูจน์เอกลักษณ์	44
4.1.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	44
4.1.1.1 ลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้.....	44
4.1.1.2 กราฟ UV- visible spectroscopy ที่เวลาการสังเคราะห์แตกต่างกัน	45
4.1.2 ผลการศึกษาผลของปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนในการสังเคราะห์สาร แขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์	46
4.1.2.1 สีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ พอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน.....	46
4.1.2.2 กราฟค่าดูดกลืนแสงของสารซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนที่ PVP แตกต่างกัน	48
4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์Transmission electron microscope และ เทคนิค SAED	49
4.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ และการพิสูจน์เอกลักษณ์.....	50
4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ.....	50
4.2.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของกราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่า ดูดกลืนแสง.....	51
4.2.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ของกราฟีนออกไซด์	51
4.2.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน	52
4.2.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของแผ่นของผสม NR/AgNPs/GO ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน	54
4.2.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ของกราฟีนออกไซด์.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน.....	56
4.2.1.7 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ของแผ่นของผสม NR/AgNPs/GO ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน	57
4.2.1.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Raman ของกราฟีนออกไซด์	58
4.2.1.9 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Raman ของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน.....	59
4.2.1.10 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาคของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน	60
4.2.1.11 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาคของแผ่นของผสม NR/AgNPs/GO ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน	62
4.2.1.12 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDX ของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน.....	63
4.2.1.13 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDX ของแผ่นของผสม NR/AgNPs/GO ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน	65
4.2.1.14 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะกราฟีนออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	67
4.2.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ.....	68
4.2.2.1 ลักษณะแผ่นของผสมยางธรรมชาติและสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	68
4.2.2.2 ลักษณะของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้.....	69
4.2.2.3 ลักษณะแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนและกราฟีนออกไซด์	69
4.3 การศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ	70
4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณแตกต่างกัน	70
4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ต่างกัน	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์	73
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพทางเชิงกล และสมบัติทางความร้อน.....	75
4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพทางเชิงกล	75
4.4.2 การวิเคราะห์เชิงความร้อน.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการวิจัย	81
5.1.1 การศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนและการพิสูจน์เอกลักษณ์.....	81
5.1.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติและการพิสูจน์เอกลักษณ์.....	81
5.1.3 การศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ.....	81
5.1.4 การศึกษาสมบัติทางเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
เอกสารอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบของอนุภาคทรงกลมของยาง.....	5
2.2 แสดงองค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	5
2.3 แสดงสมบัติทั่วไปของซิลเวอร์.....	8
2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของซิลเวอร์	8
2.5 แสดงสมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลไพโรลิโดน.....	20
2.6 แสดงความแตกต่างของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ	27
3.1 แสดงสัดส่วนโดยน้ำหนักของ $AgNO_3$ กับ PVP ที่ใช้ในการศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ตามลำดับ	36
3.2 แสดงเงื่อนไขในการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ปริมาณที่แตกต่างกัน.....	37
3.3 แสดงเงื่อนไขในการเตรียมวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนสังเคราะห์ได้จากสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนในปริมาณที่แตกต่างกัน	37
3.4 แสดงเงื่อนไขในการเตรียมวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่เติมกราฟีนออกไซด์.....	40
4.1 แสดงค่าการทดสอบทางเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นของผสมยางธรรมชาติ	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน	4
2.2 แสดงลักษณะและองค์ประกอบของอนุภาคทรงกลมของยาง	5
2.3 แสดงลักษณะอนุภาคของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลม	9
2.4 แสดงรูปซิลเวอร์อนุภาคขนาดใหญ่ (Bulk particles) และ อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (AgNPs) .	9
2.5 แสดงปรากฏการณ์ Surface plasmon resonance ของสารที่มีขนาดอนุภาคนาโน และช่วงการดูดกลืนแสง ของสารที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน.....	10
2.6 แสดงลักษณะรูปร่างและสีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีรูปร่างที่แตกต่างกัน.....	10
2.7 แสดงลักษณะอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะรูปทรงแบบแท่ง (Nanorod) ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค Ultraviolet irradiation photoreduction technique.....	13
2.8 แสดงลักษณะอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะลักษณะแผ่นบาง ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Photoin reduction	13
2.9 แสดงปฏิกิริยารีดักชันของ $Ag(NH_3)_2^+$ ด้วยเทคนิค Tollens method	14
2.10 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสาร Gallocatechol ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของ สารแคเทชิน (Catechin) ในผงชาเขียว.....	16
2.11 แสดงการนำอนุภาคนาโนซิลเวอร์มาประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน	16
2.12 แสดงการช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ	17
2.13 แสดงการเกิดการสั่นของสารไดอิเล็กทริก (น้ำ) เมื่อผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	18
2.14 แสดงโครงสร้างของ N-Vinylpyrrolidone และ Polyvinylpyrrolidone	20
2.15 แสดงโครงสร้างของ Graphene และ Grapheme Oxide.....	22
2.16 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค Hummer's method.....	23
2.17 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ธรรมชาติฟอกไซด์ผสมกราฟีนออกไซด์ (ENR)	24
2.18 แสดงกราฟ Tensile strenght ของแผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	25
2.19 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ	28
2.20 แสดงกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (AgNPs)	28
2.21 แสดงกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมพอลิเมอร์ (Polymer composite)	29
4.1 แสดงลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในเวลา ที่แตกต่างกันจาก 0 – 105 วินาที	44
4.2 แสดงช่วงของการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ ในเวลาที่แตกต่างกัน	45
4.3 แสดงลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในปริมาณ สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกันจากซ้ายไปขวา	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงกลไกการที่เป็นไปได้ในการเกิดผลึกอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพ.....	47
4.5 แสดงลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การรวมตัวกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เรียกว่าปรากฏการณ์ Coalescence และ ปรากฏการณ์ Ostwald ripening.....	47
4.6 แสดงช่วงของการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน	48
4.7 แสดงภาพถ่ายของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน (a) – (e), แสดงผลึกของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากเทคนิค SAED	49
4.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารซิลเวอร์อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน	50
4.9 แสดงค่าการดูดกลืนแสงจากเทคนิค UV-vis ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้.....	51
4.10 แสดง FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันต่างๆของกราฟีนออกไซด์.....	52
4.11 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นของผสมในเนื้อไน NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.75 และ NR/Ag-PVP-1.25 ตามลำดับ	53
4.12 แสดงกราฟ FT-IR ของ NR, NR/Ag-PVP-0.25, NR/GO-0.75 และ NR/Ag/GO-0.75.....	54
4.13 XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) เปรียบเทียบกับแผ่นวัสดุผสมจาก ยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ พอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน ได้แก่ คือ PVP-0.25 PVP-0.75 และ PVP-1.25.....	54
4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันระหว่างกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ที่.....	55
4.14 แสดงกราฟ XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นของผสมในเนื้อไน NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.75 และ NR/Ag-PVP-1.25 ตามลำดับ	56
4.15 แสดงกราฟ XRD ของแผ่น NR, NR/Ag-PVP-0.25, NR/GO-0.75 และ NR/Ag/GO-0.75 ตามลำดับ.....	57
4.16 แสดง Raman spectra ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้.....	58
4.17 แสดงกราฟ Raman spectra ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นของผสมในเนื้อไน NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.75 และ NR/Ag-PVP-1.25 ตามลำดับ	59
4.18 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า.....	60
4.19 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสม ธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเนื้อไน NR/Ag-PVP-0.25 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.75 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า.....	61
4.21 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-1.25 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า.....	61
4.22 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.25 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า	62
4.23 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมธรรมชาติที่ในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.75 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า.....	62
4.24 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติ (c).....	63
4.25 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25 (c).....	63
4.26 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.75 (c).....	64
4.27 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-1.25 (c)	64
4.28 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.25	65
4.29 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.50	66
4.30 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.75.....	66
4.31 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้	67
4.32 แสดงภาพถ่ายของแผ่นยางธรรมชาติ (ซ้าย) และแผ่นยางธรรมชาติผสมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโนในอัตราส่วนเงื่อนไข Ag/PVP-1.00 (ขวา)	68
4.33 แสดงรูปสารกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการตัดแปลงของซุเมอร์.....	69
4.34 แสดงภาพถ่ายของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโน (ซ้าย) และแผ่นยางธรรมชาติผสมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ในเงื่อนไข Ag/GO-0.75 (ขวา).....	69
4.35 แสดงภาพถ่ายประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดย NR คือ แผ่นยางธรรมชาติ และ S1-S3 คือ แผ่นของผสมในเงื่อนไข NR/Ag-1.00 - NR/Ag-3.00 ตามลำดับ.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 แสดงค่าระยะบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวก และแกรมลบของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมลงไปปริมาณ 1 2 และ 3 mL ตามลำดับ	71
4.37 แสดงภาพถ่ายประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.50, NR/Ag-PVP-0.75 NR/Ag-PVP-1.00, NR/Ag-PVP-1.25 เทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ (NR)	72
4.38 แสดงค่าระยะบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวก และแกรมลบของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติตามเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.50, NR/Ag-PVP-0.75, NR/Ag-PVP-1.00 และ NR/Ag-PVP-1.25 ตามลำดับ.....	73
4.39 แสดงภาพถ่ายประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>S. aureus</i> และ <i>E. coli</i> ของแผ่นของผสมเปรียบเทียบกับระหว่าง ตัวอย่าง S1 คือ แผ่นยางธรรมชาติ, S2 คือแผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์, S3 คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมซิลเวอร์ไอออน (Ag^+), S4 คือ เงื่อนไข NR/Ag/GO-0.25 S5 คือ เงื่อนไข NR/Ag/GO-0.50 และ S6 คือ เงื่อนไข NR/Ag/GO-0.75 ตามลำดับ	74
4.40 แสดงค่าระยะบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวก และแกรมลบ ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ NR, NR/Ag ⁺ , NR/GO-0.75, NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75	74
4.41 แสดงค่าความเค้นที่โหลดสูงสุด (stress at maximum load) ของแผ่นยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบกันระหว่าง NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75	75
4.42 แสดงค่ารับโหลดก่อนขาด (load at break) ของแผ่นยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบกันระหว่างเงื่อนไข NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75.....	76
4.43 แสดงค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) ของแผ่นยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบกันระหว่างเงื่อนไข NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75	76
4.44 แสดงค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของแผ่นยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบกันระหว่างเงื่อนไข NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75.....	77
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับเปอร์เซ็นต์ความเครียดของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ เปรียบเทียบกันระหว่างเงื่อนไข NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75	78
4.46 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อน (Themogram) ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ตามเงื่อนไข PVP-0.25 และ แผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75 ตามลำดับ.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 แสดงกราฟการ DTG ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติ เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ตามเงื่อนไข PVP-0.25 และ แผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75 ตามลำดับ	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber) เป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน จัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษ คือ มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อแรงดึงสูง ทนต่อแรงขีดถู มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า [1] ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ยานพาหนะ ยางรถยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์กีฬา และอุปกรณ์ก่อสร้าง เป็นต้น แต่เนื่องจากวัสดุจากยางธรรมชาตินั้นยังมีจุดด้อยในด้านความแข็งแรง และมีสิ่งปนเปื้อนได้ง่าย เพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุจากยางธรรมชาติให้ตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์มากขึ้น ปัจจุบันจึงได้มีการเตรียมยางธรรมชาติในลักษณะของวัสดุผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆ [2]

เนื่องด้วยการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติโดยส่วนมากในจะต้องมีการสัมผัสกับมนุษย์โดยตรง เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์กีฬา หรือบรรจุภัณฑ์อาหารต่างๆ หากผลิตภัณฑ์มีการปนเปื้อนจากเชื้อแบคทีเรียหรือสิ่งสกปรกก็อาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้ ดังนั้นการเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้กับวัสดุจากยางธรรมชาตินั้นเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งการเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสามารถทำได้โดยเติมสารที่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial agents) ลงไปในยางธรรมชาติให้อยู่ในลักษณะของวัสดุผสม โดยในปัจจุบันสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (AgNPs) นิยมนำมาใช้งานด้านการยับยั้งแบคทีเรียเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กในระดับนาโนเมตร (1-100 nm) จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสูง สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี [3]

ปัจจุบันสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยส่วนมากจะเป็นการใช้สารเคมีที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อร่างกายและอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ ดังนั้นปัจจุบันจึงได้มีการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารพอลิเมอร์ ซึ่งมีอยู่หลายชนิดและหนึ่งในนั้นคือ พอลิไวนิลไพโรลิโดน หรือ PVP จัดเป็นสารพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความสามารถเป็นทั้งสารให้อิเล็กตรอน (Reducing agent) และสารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizing agent) ให้กับสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน [4] โดยการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อน (Conventional heating) เทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) หรือ เทคนิคโซโนเคมี (Sonochemical method) เป็นต้น แต่ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคทางคลื่นไมโครเวฟ (Microwave assisted) มาช่วยในการสังเคราะห์ เนื่องจากจะทำให้ได้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดเล็กและขนาดสม่ำเสมอ [5]

เพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพการนำไปใช้งานของวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่ได้กล่าวมาข้างต้นให้ดียิ่งขึ้น ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาสมบัติทางเชิงกลให้กับวัสดุผสมจากยางธรรมชาติโดยเติมสารจำพวกสารประกอบคาร์บอน (Carbon) ที่มีความแข็งแรง ชนิดต่างๆ เช่น คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ผงถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotube) และกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide, GO) ลงไปในยางธรรมชาติ [6, 7] ซึ่งกราฟีนออกไซด์จัดเป็น

สารประกอบคาร์บอนชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผสมกับวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางเชิงกลและความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรงในปัจจุบัน [8] เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงสูง และเป็นสารที่มีขี้สามารถละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำที่ดี ซึ่งเหมาะแก่การนำมาผสมในวัสดุผสมจากยางธรรมชาติ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยเติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากการใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งสารที่ให้อิเล็กทรอนิกส์ และช่วยรักษาเสถียรภาพด้วยเทคนิคทางคลื่นไมโครเวฟ และศึกษาการเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับวัสดุผสมนี้ด้วยการเติมกราฟีนออกไซด์ จากนั้นนำแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เตรียมได้ไปทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ทดสอบสมบัติทางเชิงกล สมบัติทางความร้อน และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการสังเคราะห์ AgNPs ด้วยเทคนิคทางคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ PVP เป็นทั้งสารให้อิเล็กตรอน (Reductant) และสารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer)
2. ศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่ผสม AgNPs ด้วยวิธีการผสมและขึ้นรูปอย่างง่าย (latex mixing and casting method)
3. ศึกษาการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (GO) และกราฟีนออกไซด์ ด้วยวิธีการตัดแปลงของฮัมเมอร์ (Hummer's method) และตามด้วยกระบวนการโซนิเคชัน (Sonication) ตามลำดับ
4. ศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่ผสม AgNPs และ GO ด้วยวิธีการผสมและขึ้นรูปอย่างง่าย
5. พิสูจน์เอกลักษณ์ของ AgNPs และแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น UV-visible, FTIR, Raman, EDX, XRD และ SEM เป็นต้น
6. ศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย สมบัติทางเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการสังเคราะห์ AgNPs ด้วยเทคนิคทางคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ PVP เป็นทั้งสารให้อิเล็กตรอน และสารเพิ่มเสถียรภาพ ที่เวลาแตกต่างกัน คือ 15 30 45 60 75 90 105 วินาที ตามลำดับ
2. ศึกษาปริมาณ PVP ที่ใช้ในการสังเคราะห์ AgNPs ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก AgNO_3 กับ PVP ที่แตกต่างกัน คือ 1:0.25 1:0.5 1:0.75 1:1 และ 1:1.25 ตามลำดับ และศึกษาผลของความเข้มข้นและขนาดอนุภาคของสารซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis) และ เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)
3. ศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เติม AgNPs ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1 2 และ 3 mL ตามลำดับ
4. ศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เติม AgNPs ที่สังเคราะห์ได้จากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ PVP ที่แตกต่างกัน
5. ศึกษาการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (GO) ด้วยวิธีการตัดแปลงของฮัมเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่เติม AgNPs และ GO ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0.25 0.50 และ 0.75 ร้อยละโดยน้ำหนัก
7. ศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคต่างๆ คือ UV-vis, FTIR, XRD, EDX, SEM และ Raman
8. ศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติกับเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* ตามลำดับ
9. ศึกษาสมบัติทางเชิงกลและทางความร้อนของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการทดสอบแรงดึง (UTM) และ เทคนิคการทดสอบการสลายตัวทางความร้อน (TGA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และเข้าใจการสังเคราะห์ AgNPs ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ โดยใช้ PVP เป็นทั้งสารให้อิเล็กตรอน และสารเพิ่มเสถียรภาพ
2. สามารถทราบถึงผลของปริมาณของ PVP ที่ส่งผลต่อความเข้มข้นและขนาดอนุภาคของ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้
3. สามารถเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่ผสม AgNPs
4. สามารถเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่ผสม AgNPs และ GO
5. สามารถเพิ่มความหลากหลายในการใช้ประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าให้กับแผ่นยางธรรมชาติรวมทั้งน้ำยางธรรมชาติ
6. สามารถนำงานวิจัยไปเผยแพร่ในงานประชุมทางวิชาการ

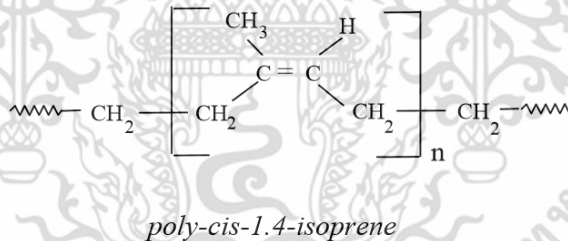
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber) จัดเป็นสารพอลิเมอร์ (Polymer) ชนิดหนึ่งที่ได้มาจากต้นยางพารา (Hevea Brasiliensis) มีต้นกำเนิดที่ทวีปอเมริกาใต้แถบกลุ่มแม่น้ำอามาซอน เนื่องจากเจริญเติบโตได้ดีในภูมิอากาศร้อนชื้น ต่อมาจึงนิยมปลูกในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น มาเลเซีย ไทย เวียดนาม อินโดนีเซีย เนื่องจากมีฝนตกชุกและมีสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25 - 28 °C ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตยางได้มากที่สุดในโลกประมาณ 3.1 ล้านตันต่อปี มีพื้นที่ปลูกยางมากกว่า 16.7 ล้านไร่ ในปี 2552

ยางธรรมชาติจะมีองค์ประกอบหลัก คือ สายโซ่พอลิเมอร์ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1.4 isoprene) มากถึง 99.99 % และมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน และฟอสโฟลิพิด โดยสายโซ่พอลิเมอร์ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน จะมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรงและยาว มีหน่วยซ้ำคือ ไอโซพรีน (C₅H₈) มีโครงสร้างแสดงดังรูป 2.1 ซึ่งยางธรรมชาติจะมีสมบัติเด่นในด้าน มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อแรงดึงสูง ทนต่อแรงขีดถู มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ยานพาหนะ ยางรถยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์กีฬา และอุปกรณ์ก่อสร้าง เป็นต้น [1]

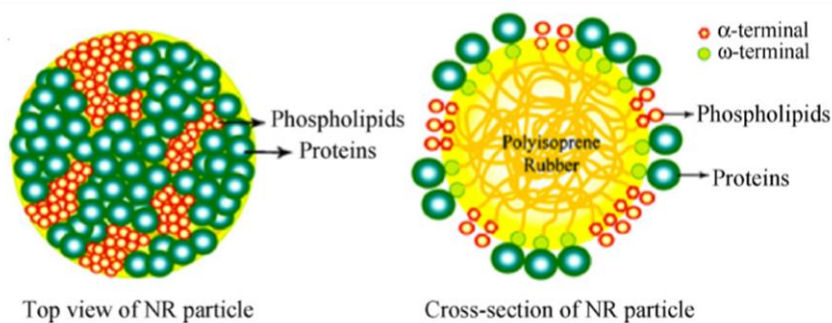


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1.4 isoprene) [9]

2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) เป็นส่วนของของเหลวที่ได้มาจากการกรีดต้นยางพารามีลักษณะเป็นสารแขวนลอย (Colloid) สีขาวขุ่นคล้ายน้ำนม เกิดจากอนุภาคทรงกลมของยาง (Latex particles) ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.05 - 3 ไมโครเมตร กระจายตัวอยู่ในน้ำที่เรียกว่า เซรั่ม (Serum) อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอนุภาคทรงกลมของยางจะประกอบด้วย โปรตีน ฟอสโฟลิพิด และสายโซ่พอลิเมอร์ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน โดยสายโซ่พอลิเมอร์ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน จะถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคของโปรตีน และฟอสโฟลิพิด ดังรูป 2.2 จึงทำให้อนุภาคทรงกลมของยางมีประจุที่ผิวเป็นลบ (Negative charge) สามารถเกิดการกระจายตัวในน้ำได้ดี เนื่องจากแรงผลักระหว่างประจุ ถ้าหากเยื่อหุ้มอนุภาคถูกทำลายจะทำให้เนื้อยางเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนเกิดขึ้น ซึ่งเมื่อนำอนุภาคทรงกลมของยางมาวิเคราะห์จะพบองค์ประกอบแสดงดังตาราง 2.1 [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะและองค์ประกอบของอนุภาคทรกกลมของยาง (Latex particles) [10]

โดยทั่วไปน้ำยางธรรมชาติจะมีค่า pH ประมาณ 6.5 -7.5 และมีความหนาแน่น 0.97 -0.98 g/cm³ นอกจากนี้น้ำยางธรรมชาติยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของอนุภาคทรกกลมของยาง (Latex particles) [11]

องค์ประกอบของเม็ดยาง	ปริมาณ (%)
เนื้อยาง	86
น้ำในอนุภาค	10
โปรตีน	1
สารจำพวก Lipid	3
โลหะต่างๆ เช่น แมกนีเซียม ปะปนในเม็ดยาง	น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) [11]

องค์ประกอบของน้ำยาง	ปริมาณ (%)
เนื้อยาง	30 - 40
โปรตีน	1.0 - 1.5
เรซิน	1.5 - 3.0
แร่ต่างๆ	0.7 - 0.9
คาร์โบไฮเดรต	0.8 -1.0
น้ำ	55 - 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 น้ำยางข้น

น้ำยางข้น (Concentrated latex) เป็นน้ำยางที่ได้มาจากการนำน้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพารามาผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง (Centrifuged) เพื่อแยกน้ำและสารอื่นๆ ออกจากน้ำยาง ซึ่งโดยปกติน้ำยางธรรมชาติจะมีปริมาณเนื้อยาง (Dry rubber content) เฉลี่ยประมาณ 35% ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber solid) อีก 5% และน้ำ (Water) ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง น้ำยางข้นที่ได้จะเรียกว่า Centrifuged latex ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งอยู่อย่างน้อย 60 % กับหางน้ำยาง จากนั้นจะต้องรักษาสภาพน้ำยางข้นด้วยการเติมสารละลายแอมโมเนีย (NH_4OH) เพื่อป้องกันไม่ให้ยางจับตัวกัน โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่

- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia, HA) จะมีสารละลายแอมโมเนียร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก
- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia, LA) จะมีสารละลายแอมโมเนียร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก

2.1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

สมบัติของยางธรรมชาติมีทั้งข้อโดดเด่นและข้อด้อย ทำให้การนำไปใช้งานมีความหลากหลายแตกต่างกันออกไป ซึ่งสมบัติของยางธรรมชาติ [1] แสดงได้ดังนี้

1. ความยืดหยุ่น (Elasticity) เป็นลักษณะเฉพาะที่โดดเด่นสำหรับยางธรรมชาติ กล่าวคือเมื่อยางธรรมชาติได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะทำให้ยางเสียรูปช่วงขณะหนึ่ง และหลังจากแรงกระทำนั้นหมดไปยางธรรมชาติจะสามารถกลับมาคงรูปได้เช่นเดิม
2. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ยางธรรมชาติมีการจัดเรียงโมเลกุลที่เป็นระเบียบสูง เมื่อยางธรรมชาติถูกดึงยึดจะทำให้เกิดการแตกหักของโมเลกุล ซึ่งการแตกหักของโมเลกุลจะเป็นตัวช่วยเสริมแรงให้กับยางยางธรรมชาติ ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงสูงมากโดยที่ไม่ต้องใช้สารช่วยเสริมแรงชนิดอื่นๆ
3. ความทนต่อการฉีกขาด (Shear strength) การแตกหักของโมเลกุลของยางธรรมชาติ นอกจากจะช่วยในการทนต่อแรงดึงแล้ว ยังสามารถช่วยให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง
4. ความทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการขัดถูสูง ซึ่งคล้ายกับการทนต่อการฉีกขาด
5. ความเหนียวติดกัน (Tack) เป็นสมบัติของยางธรรมชาติที่ยังไม่คงรูป เหมาะสมกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น
6. สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติในการสูญเสียทางความร้อนที่ต่ำในระหว่างการใช้งาน และทนต่อความล้า (Fatigue resistance) ได้สูงมาก
7. ความเป็นฉนวน (Insulation) ยางธรรมชาติมีความสามารถในการเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี โดยมีความต้านทานทางไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) อยู่ที่ $10^{15} - 10^{16}$ โอห์ม.เซนติเมตร
8. ความทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) เนื่องจากยางธรรมชาติมีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถถูกละลายได้ดีในสารไม่มีขั้วต่างๆ เช่น เบนซีน เฮกเซน โทลูอีน หรือสารปิโตรเลียมต่างๆ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. การเสื่อมสภาพเนื่องจาก โอโซนและแสงแดด (Aging properties) ยางธรรมชาติจะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย เนื่องจากในโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก จึงทำให้ยางไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่ง

10. การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังสามารถแสดงสมบัติความยืดหยุ่นได้ที่อุณหภูมิต่ำ

11. การเสีรูปหลังการกด (Compression set) ยางธรรมชาติจะมีการเสีรูปหลังการกดต่ำ ณ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิปานกลาง แต่จะเสีรูปจากแรงกดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสูญเสียความยืดหยุ่น และเมื่ออุณหภูมิสูงเนื่องจากยางธรรมชาติไม่มีความสามารถทนต่อความร้อนได้

12. การกระด้างกระดอง (Rebound resilience) ยางธรรมชาติจะมีสมบัติการกระด้างกระดองสูงและจะสูญเสียพลังงานความร้อนน้อยเมื่อเปลี่ยนรูป จึงทำให้ยางธรรมชาติมีความร้อนสะสมที่ต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต

13. อุณหภูมิของการใช้งาน (Service temperature) อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของยางธรรมชาติจะอยู่ที่ช่วง 55 – 70 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิต่ำเกินไปจะเกิดการตกผลึกและเสียความยืดหยุ่น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ

2.1.4 การพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติ

Hashim และ Ong [2] ได้เตรียมยางธรรมชาติที่ปรับปรุงด้วยพอลิสไตรีน (polystyrene-modified natural rubber; SNR) เพื่อใช้เป็นสารที่ทำให้ของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาติมีความเข้ากันได้ดี โดยเตรียม SNR จากสไตรีนร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และเนื้อยางแห้งปริมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก โดยให้เกิดปฏิกิริยา *In situ* polymerization พบว่า ของผสมที่มีระบบการวัลคาไนซ์แบบ Efficient curative system มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเติม SNR ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และของผสมที่มีระบบการวัลคาไนซ์แบบ semi-Efficient curative system ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเติม SNR ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และการเติม SNR ทำให้ของผสมมีคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าของผสมที่ไม่เติม SNR

Ismail และคณะ [12] ได้ศึกษาวัสดุผสมจากเก้าแกลบขาว (WRHA-polypropylene/natural rubber) โดยศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุนี้ พบว่า การเติม WRHA ในพอลิโพรพิลีนที่ผสมกับยางธรรมชาติ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติการทนต่อแรงดึงได้ แต่คุณสมบัติด้าน tensile strength, elongation at break และ stress at yield มีค่าลดลงเมื่อเติม WRHA ปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งคุณสมบัติที่ลดลงเหล่านี้ มีสาเหตุเนื่องมาจากการมีอันตรกิริยาที่ไม่ดีระหว่าง matrix กับสารตัวเติม นอกจากนี้ Ismail และคณะ ได้ทำการทดลองเติม silane coupling agent 3-aminopropyl triethoxysilane (3-APE) ลงไปในวัสดุผสม พบว่าสามารถปรับปรุงคุณสมบัติ Tensile modulus, Tensile strength และ Stress at yield ได้

2.2 ซิลเวอร์

ซิลเวอร์ (Silver) หรือ เงิน เป็นธาตุโลหะหนักที่ถูกค้นพบมานานกว่า 5000 ปี และเริ่มนิยมนำมาใช้งานตั้งแต่สมัยกรีกโบราณเป็นต้นมา ซิลเวอร์มีสัญลักษณ์ธาตุทางเคมี คือ “Ag” มีเลขอะตอม 47 ลักษณะเป็นของแข็งสีขาวเงิน มีสมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ซึ่งสมบัติทั่วไป และสมบัติทางกายภาพของซิลเวอร์ แสดงดังตารางที่ 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทั่วไปของซิลเวอร์ [13]

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 [13]

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)

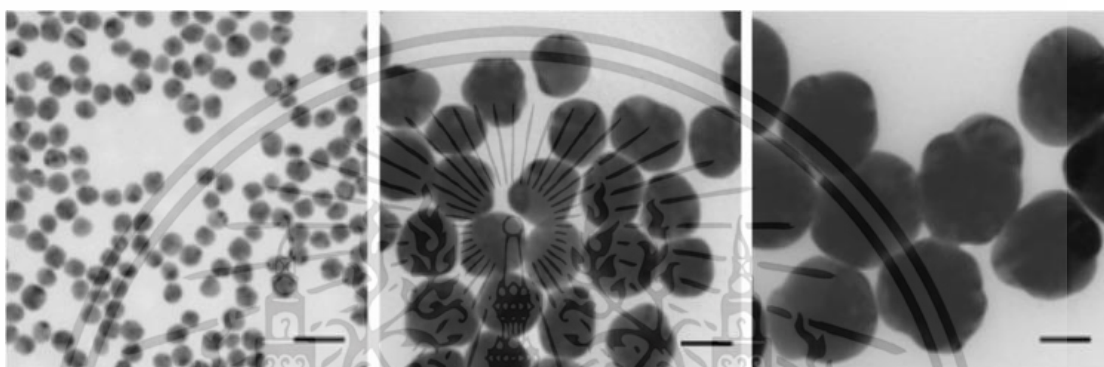
จากสมบัติของซิลเวอร์ดังแสดงในตารางข้างต้น ปัจจุบันจึงได้มีการนำซิลเวอร์มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

- ใช้ทำกระจกเงา เนื่องจากซิลเวอร์เป็นโลหะที่มีความเงามากที่สุดจึงนิยมนำมาฉาบด้านหลังของกระจก
- โลหะตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากซิลเวอร์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี จึงถูกใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ไมโครเวฟ เครื่องซักผ้า โทรทัศน์ เป็นต้น
- ใช้ทำเครื่องประดับ เนื่องจากซิลเวอร์มีความมันเงาสวยงาม เช่น แหวน กำไล ต่างหู เป็นต้น
- ใช้งานด้านการแพทย์ เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ทางการแพทย์ต่างๆ เช่น สายสวนปัสสาวะ ท่อช่วยหายใจ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 อนุภาคนาโนซิลเวอร์

อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Silver nanoparticles, AgNPs) คือ ซิลเวอร์อนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับ 1 – 100 นาโนเมตร โดยส่วนมากจะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย (Silver colloid) อยู่ในน้ำ เนื่องจากประจุที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์แต่ละอนุภาคมีความเป็นบวก (Positive charge) เหมือนกัน จึงทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์กระจายตัวอยู่ในน้ำได้ดีและไม่ทำให้เกิดการรวมตัวกัน และเนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตร จึงทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีพื้นที่ผิว (Surface to volume ratio) มากกว่าซิลเวอร์อนุภาคขนาดใหญ่ (Bulk particles) ซึ่งลักษณะอนุภาคนาโนซิลเวอร์แสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะอนุภาคของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลม (Spherical shape) ขนาดอนุภาค 20 60 และ 100 นาโนเมตร ตามลำดับ [14]

เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก จึงทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีสมบัติในด้านต่างๆแตกต่างจากซิลเวอร์อนุภาคขนาดใหญ่โดยสิ้นเชิง ซึ่งสมบัติเด่นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่แตกต่างจากซิลเวอร์อนุภาคขนาดใหญ่ ได้แก่ สมบัติเชิงแสง (Optical properties) โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ สามารถเกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า “Surface plasmon resonance” หรือ SPR ทำให้เห็นสีของสารแตกต่างไปจากปกติ โดยซิลเวอร์อนุภาคขนาดใหญ่ จะมีลักษณะสีเงินมันวาว แต่อนุภาคนาโนซิลเวอร์ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะมีสีเหลืองส้ม แสดงดังรูป 2.4

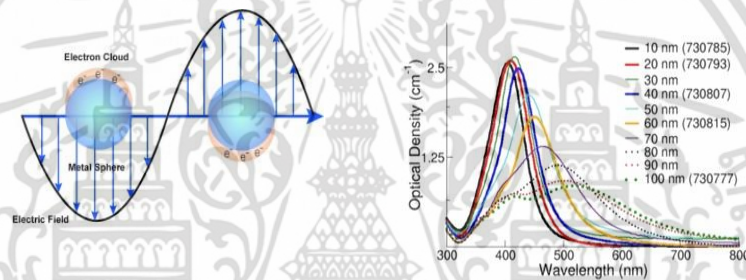


รูปที่ 2.4 (ซ้าย) แสดงรูปซิลเวอร์อนุภาคขนาดใหญ่ (Bulk particles) (ขวา) อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (AgNPs) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

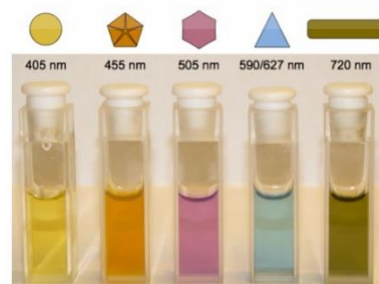
2.2.2 เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance; SPR)

เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance หรือ SPR) เป็นปรากฏการณ์เชิงแสงของสารที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงระดับนาโนเมตร โดยเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้สารที่มีอนุภาคขนาดเล็กเกิดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ต่ำกว่าปกติ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของสารอนุภาคขนาดเล็กเกิดการสั่นรวม (Collective oscillation) เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นแสง (Light) มาตกกระทบที่พื้นผิว ซึ่งถ้าความยาวคลื่นของแสงที่มาตกกระทบมีค่าเท่ากับความยาวคลื่นของการสั่นรวมของอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดอัตรการกระเจิงแสงสองแบบ คือ แสงจะตกกระทบและสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิมทุกทิศทาง เรียกว่า การกระเจิงแสง (Scattering) และในขณะเดียวกันบางโฟตอนก็จะถูกดูดกลืนและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น เรียกว่า การดูดกลืนแสง (Absorption) ดังนั้นสารที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะเกิดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่าปกติและจะยังมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดอนุภาคของสารเล็กลง โดยช่วงของการดูดกลืนแสงสามารถตรวจสอบด้วยเทคนิค UV-visible spectroscopy และนอกจากนี้สารที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่มีรูปร่างที่แตกต่างกันก็จะมีช่วงของการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันอีกด้วย



รูปที่ 2.5 (ซ้าย) แสดงปรากฏการณ์ Surface plasmon resonance ของสารที่มีขนาดอนุภาคนาโน (ขวา) แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน [14]

จากรูปที่ 2.5 (a) แสดงลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ SPR ของสารอนุภาคระดับนาโน เนื่องจากอนุภาคของสารมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงหรือโฟตอนที่ตกกระทบบนพื้นผิว ทำให้ช่วงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค สามารถตรวจสอบช่วงการดูดกลืนแสงได้โดยเทคนิค UV-visible spectroscopy ดังรูป 2.5 (b) ปัจจุบันอนุภาคนาโนซิลเวอร์ยังสามารถสังเคราะห์ให้อยู่ในลักษณะรูปร่างต่างๆได้ ซึ่งอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีรูปร่างที่แตกต่างกันก็จะมีช่วงของการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันอีกด้วย ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะรูปร่างและสีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีรูปร่างที่แตกต่างกัน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป ในปัจจุบันวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์จะสามารถแบ่งได้ 3 วิธีการ คือ วิธีการสังเคราะห์ทางกายภาพ (Physical methods) วิธีการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical methods) และวิธีการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Bio-based methods) สามารถอธิบายได้ดังนี้ [17]

2.2.3.1 วิธีการสังเคราะห์ทางกายภาพ (Physical methods)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีทางกายภาพเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ไม่มีสารเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่จะใช้หลักทางความร้อนหรือทางไฟฟ้ามาเป็นตัวช่วยในการสังเคราะห์ ซึ่งข้อดีของการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางกายภาพ คือ สามารถสังเคราะห์ได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีสิ่งเจือปนที่มาจากสารละลาย เนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นจะใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงมาก โดยเทคนิคที่นิยมได้แก่ Evaporation-condensation และ Laser ablation ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่

Evaporation-condensation

- งานวิจัยของ Jung J. และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีการระเหย และการควบแน่น โดยใช้หลักการให้ความร้อนผ่านแผ่นเซรามิกขนาดเล็ก ทำให้สารเกิดการระเหยและควบแน่น ซึ่งการให้ความร้อนผ่านแผ่นเซรามิกขนาดเล็กจะทำให้สารได้รับอุณหภูมิที่สูงและคงที่ สามารถควบแน่นได้ด้วยอัตราการเย็นตัวที่คงที่ ทำให้ได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลมที่มีความเข้มข้นและมีความบริสุทธิ์สูง โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 6.2 - 21.5 นาโนเมตร [18]

Laser ablation

- งานวิจัยของ Mafune F. และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธี Laser ablation ซึ่งเป็นการใช้ลำแสงเลเซอร์ขนาดประมาณ 1- 3 มิลลิเมตร ยิงเข้าไปในหลอดแก้ว ซึ่งภายในหลอดแก้วมีแผ่นโลหะซิลเวอร์ที่อยู่ในสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ชื่อว่า โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) เมื่อแผ่นโลหะซิลเวอร์ถูกยิงด้วยลำแสงเลเซอร์จะทำให้เกิดเป็นอนุภาคเล็กๆ เกาะอยู่กับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (SDS) จากนั้นจึงนำไปผ่านการคัดแยกเพื่อให้ได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่บริสุทธิ์ โดยข้อดีของเทคนิคนี้ คือ จะได้สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่บริสุทธิ์ปราศจากสารเคมี แต่มีข้อเสียคือ การสังเคราะห์ด้วยเลเซอร์จะต้องควบคุมตัวแปรหลายชนิด เช่น ความยาวคลื่น (Wavelength) พัลส์ของลำเลเซอร์ (Pulses) ระยะเวลา (Duration) และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (SDS) ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย เป็นต้น [19]

2.2.3.2 วิธีการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical methods)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีทางเคมี เป็นการสังเคราะห์ที่มีการใช้สารเคมีเข้ามาเกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะสารที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอน (Reducing agent) เพื่อที่จะให้อิเล็กตรอนแก่ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ให้เปลี่ยนเป็นโลหะซิลเวอร์ (Ag^0) ซึ่งสารให้อิเล็กตรอนที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) โซเดียมซิเตรต (Sodium Citrate) แอสคอร์เบต (Ascorbate) และกลูโคส (Glucose) เป็นต้น ในปัจจุบันนอกจากสารให้อิเล็กตรอนแล้วยังมีการเติมสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizing agent) เพื่อป้องกันการเกาะรวมตัวกัน (Agglomeration) ของอนุภาคทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ได้มีขนาดที่ใกล้เคียงกันและคงที่ โดยส่วนมากจะเป็นสารพอลิเมอร์ (Polymer) เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และพอลิไวนิลไพโรลิดอน (PVP) เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่

Chemical reduction

- งานวิจัยของ Hongshui W. และคณะได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธี Chemical reduction โดยใช้กลูโคสเป็นสารให้อิเล็กตรอน (Reducing agent) และพอลิไวนิลไพโรลิดอน (PVP) เป็น สารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizing agent) นอกจากนี้ยังเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เพื่อเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา โดยการสังเคราะห์จะค่อยๆหยดผสมสารละลาย $AgNO_3$ เข้ากับสารละลายที่มี PVP กลูโคส และ $NaOH$ ซึ่งจะนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuged) เพื่อแยกตะกอนอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ซึ่งอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมมีขนาด $20 - 80$ นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณ PVP จะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีขึ้น [20]

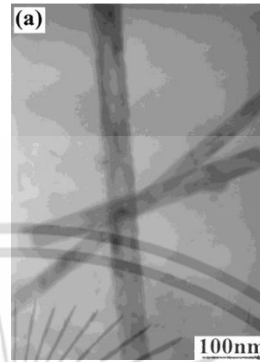
นอกจากวิธี Chemical reduction ด้วยความร้อนแล้ว อนุภาคนาโนซิลเวอร์ยังสามารถสังเคราะห์ได้จากวิธีทางเคมีด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวี (UV initiated photo-reduction) การใช้แสงโฟตอน (Photoinduced reduction) การใช้ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical synthetic method) การใช้ทอลเลนรีเอเจนต์ (Tollens method) และเทคนิคการใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave assisted method) ซึ่งตัวอย่างการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยเทคนิคทางเคมีต่างๆ แสดงดังนี้

UV initiated photo-reduction

- งานวิจัยของ Zhou Y. และคณะได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะรูปทรงแบบแท่ง (Nanorod) โดยการใช้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงของแสงเหนือม่วงหรืออัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) ที่ช่วงความยาวคลื่น $100 - 400$ นาโนเมตร เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) เรียกเทคนิคนี้ว่า Ultraviolet irradiation photoreduction technique ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้หลอดไฟปรอทความดันต่ำ (Low pressure mercury lamp) ช่วงแสง UV ขนาด 30 วัตต์ ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร เป็นแหล่งให้กำเนิดแสงเพื่อให้พลังงานแก่สารละลายที่มี $AgNO_3$ ผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ $15\text{ }^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

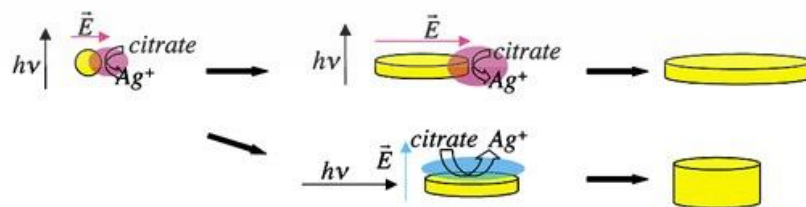
หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuged) เพื่อแยกตะกอนอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C จะได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะรูปทรงแบบแท่ง หรือ Nanorod ขนาดอนุภาค 15 – 20 นาโนเมตร แสดงดังรูป 2.7 [21]



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะรูปทรงแบบแท่ง (Nanorod) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Ultraviolet irradiation photoreduction technique [21]

Photoinduced reduction

- งานวิจัยของ M. Maillard. และคณะได้ทำการศึกษการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะแผ่นบาง (Disk-shape) โดยใช้เทคนิค Photoin reduction หรือ Photocatalytic reduction method ซึ่งมีข้อดีคือ ใช้งานง่าย มีความละเอียดสูง และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเทคนิค Photoin reduction สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่อยู่ในสารตัวกลาง (Medium) ได้หลายชนิด เช่น สารคอลลอยด์ (Emulsion) พอลิเมอร์ฟิล์ม กระดาษ เป็นต้น โดยเทคนิคนี้จะต้องมีโลหะซิลเวอร์ตัวกลาง (Silver seed) และอาศัยหลักการ Surface plasmon resonance ของโลหะซิลเวอร์ตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการจะทำการสังเคราะห์ตัวอย่างในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยฉายแสงในสารละลายที่ผสม AgNO_3 NaBH_4 Citrate และโลหะซิลเวอร์ตัวกลาง (Silver seed) ในที่มีด อุณหภูมิ 23 °C เป็นเวลา 90 นาที จะได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะแผ่นบาง (Disk-shape) ขนาดอนุภาค 8 – 20 นาโนเมตร ซึ่งกลไกการสังเคราะห์แสดงดังรูป 2.8 [22]



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะลักษณะแผ่นบาง (Disk-shape) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการรีดักชันด้วยแสง [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrochemical synthetic method

- งานวิจัยของ Dao Tri T. และคณะได้ทำการศึกษาศักยภาพการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยเทคนิค Electrochemical synthetic method ซึ่งอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมีในการสังเคราะห์ โดยใช้แท่งโลหะซิลเวอร์ 2 แท่ง เป็นขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ต่อขนานกับไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage source) ซึ่งระยะห่างระหว่างสองขั้วเท่ากับ 6.5 เซนติเมตร อยู่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่สารละลายไตรโซเดียมซิเตรท ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นให้ความต่างศักย์ขนาด 12 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จะสังเกตเห็นสารแขวนลอยเกิดขึ้น จากนั้นเก็บสารแขวนลอยไว้ในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์อย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกสิ่งเจือปนออก ซึ่งขนาดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 15 – 24 นาโนเมตร [3]

Tollens method

- งานวิจัยของ Ales Panacek และคณะได้ทำการศึกษาศักยภาพการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยเทคนิคทอลเลนรีเอเจนต์ (Tollens method) โดยใช้หลักการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+$ ด้วยสารประเภทแซ็กคาไรด์ (saccharide) เช่น กลูโคส (Glucose) ให้เปลี่ยนเป็น Ag^0 แสดงดังสมการ 2.1 ซึ่งข้อดีของเทคนิคนี้คือสังเคราะห์ได้รวดเร็ว ง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green synthesis) โดยการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้เริ่มจากการผสมสารละลาย AgNO_3 ความเข้มข้น 10^{-3} โมลต่อลิตร กับกลูโคส 0.01 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นเติมสารละลายแอมโมเนีย 0.2 โมลต่อลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เริ่มเกิดปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ $20\text{ }^\circ\text{C}$ จะได้สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ขนาดอนุภาค 25 – 450 นาโนเมตร [23]



รูปที่ 2.9 แสดงปฏิกิริยารีดักชันของ $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+$ ด้วยเทคนิค Tollens method [23]

Microwave-assisted

- งานวิจัยของ Jing Chen และคณะได้ทำการศึกษาศักยภาพการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-assisted) ในการช่วยเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีข้อดีที่แตกต่างจากการให้ความร้อนแบบปกติ คือ สังเคราะห์ได้รวดเร็ว ได้อนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคมีความเป็นผลึกสูง และไม่เกิดการรวมตัวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์โดยใช้ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโซเดียม (Carboxymethyl cellulose sodium, CMS) เป็นทั้งตัวรีดิวซ์และเพิ่มเสถียรภาพให้กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ผสมกับสารละลาย AgNO_3 และนำไปผ่านกระบวนการไมโครเวฟด้วยเครื่อง (Microwave reactor) จะได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ขนาด 15 นาโนเมตร และสามารถเก็บไว้ใช้งานได้ถึง 2 เดือน [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.3 วิธีการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Bio-based methods)

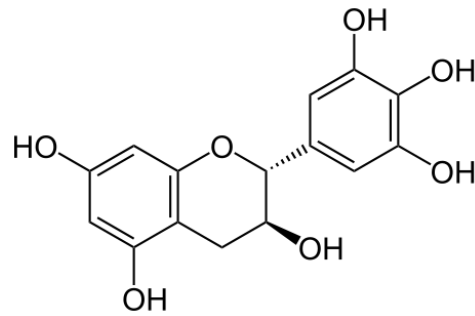
เนื่องจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยทั่วไปด้วยวิธีทางเคมีจะต้องใช้สารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-unfriendly) ในปัจจุบันจึงได้มีการวิจัยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งจะอาศัยสิ่งมีชีวิต (Organisms) เป็นตัวช่วยในการสังเคราะห์ เช่น แบคทีเรีย (Bacteria) เชื้อรา (Fungi) และพืช (Plant) ต่างๆ โดยจะมีปัจจัยทางชีวภาพต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่แตกต่างกัน เช่น ชนิดของสิ่งมีชีวิต การสืบทอดทางพันธุกรรม และเอมไซม์ของสิ่งมีชีวิต จะส่งผลต่อเสถียรภาพของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ และปัจจัยทางกายภาพ เช่น ค่าพีเอช (pH) ความเข้มข้น อุณหภูมิ เวลา จะส่งผลต่อขนาดอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่

Bacteria

- งานวิจัยของ K. Kalishwaralal และคณะได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใช้ของเหลวใส (Culture supernatant) จากแบคทีเรียชนิด *Bacillus licheniformis* เป็นตัวรีดิวซ์ Ag^+ ให้เปลี่ยนเป็น Ag^0 โดยเริ่มจากเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* ในขวดรูปชมพู่และทำการเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง 8000 รอบต่อนาที เพื่อแยกของเหลวใส ออกจากเชื้อแบคทีเรีย และนำของเหลวใสที่ได้ผสมกับสารละลาย $AgNO_3$ และทำการบ่ม (Incubate) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ขนาด 50 นาโนเมตร โดยประมาณ [25]

Plant

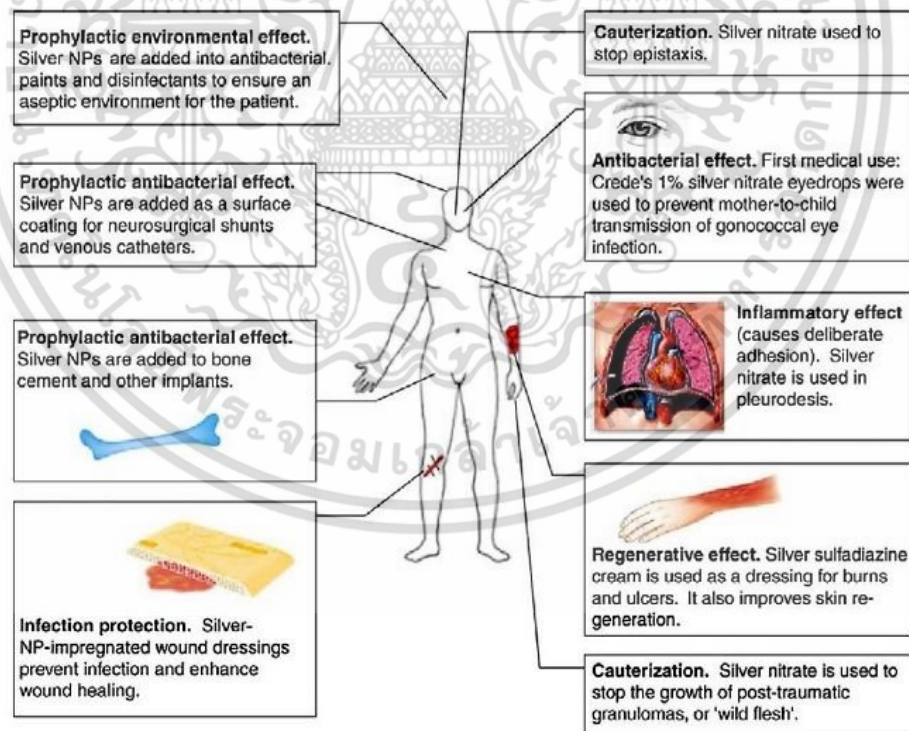
- งานวิจัยของ Alferdo R. และคณะได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใช้สารสกัดจากชาเขียวที่มีชื่อว่า *Camellia sinensis* เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งข้อดีของการใช้สารสกัดจากพืชเป็นตัวช่วยสังเคราะห์ คือ ราคาถูก ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถสังเคราะห์ได้ปริมาณมากได้ โดยในงานวิจัยนี้เริ่มจากต้มผงชาเขียวในน้ำเดือด ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เพื่อสกัดสาร *Camellia sinensis* ออกจากผงชา ซึ่งมีส่วนประกอบของแคเทชิน (Catechin) ซึ่งสามารถเป็นตัวรีดิวซ์ Ag^+ ให้เป็น Ag^0 หลังจากนั้นนำสารที่สกัดได้ผสมกับสารละลาย $AgNO_3$ ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาล แสดงถึงการเกิดผลึกของอนุภาคนาโนซิลเวอร์เพิ่มขึ้น โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสาร *Camellia sinensis* ที่เติมลงไป ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของส่วนประกอบของสารแคเทชิน แสดงดังรูป 2.10 [26]



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสาร Galocatechol ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของสารแคเทชิน (Catechin) ในผงชาเขียว [26]

2.2.4 การประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนซิลเวอร์

เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดอนุภาคที่เล็กและมีพื้นที่ผิวสูง จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์มากมาย โดยเฉพาะทางการแพทย์ หรือการยับยั้งเชื้อและฆ่าเชื้อต่างๆ เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์เมื่ออยู่ในสารละลายหรือได้รับความชื้นจะสามารถปลดปล่อยอนุภาค Ag^+ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์แบคทีเรียได้ ซึ่งตัวอย่างการนำอนุภาคนาโนซิลเวอร์มาประยุกต์ใช้งาน แสดงดังรูป 2.11

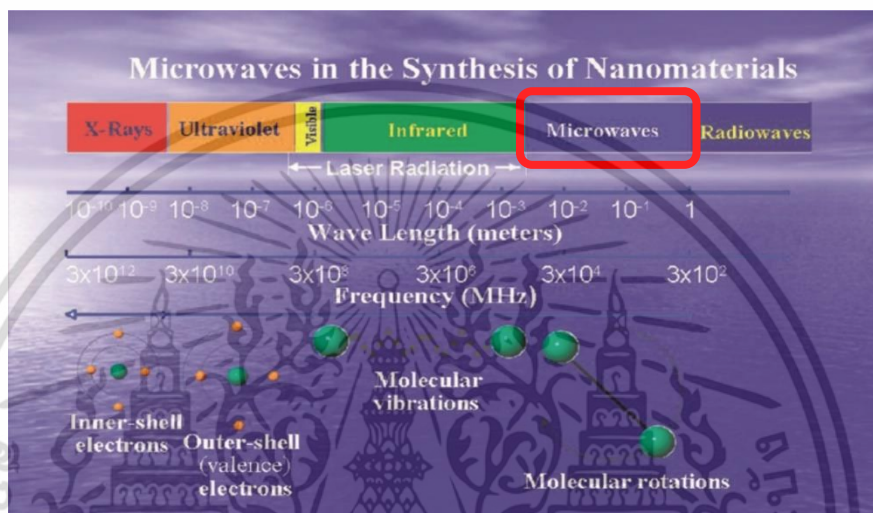


รูปที่ 2.11 แสดงการนำอนุภาคนาโนซิลเวอร์มาประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เทคนิคทางไมโครเวฟ (Microwave-assisted)

ไมโครเวฟ (Microwave) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 0.3 – 300 GHz ซึ่งอยู่ระหว่างช่วงคลื่นวิทยุ (Radio wave) กับ อินฟราเรด (Infrared) ดังรูป 2.11 ในปัจจุบันได้มีการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายทาง เช่น เตาอบไมโครเวฟ การสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ และใช้เป็นสัญญาณเรดาร์ เป็นต้น ซึ่งในการใช้งานนั้นส่วนมากนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 1GHz - 60GHz เพราะเป็นย่านความถี่ที่สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [28]



รูปที่ 2.12 แสดงการช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ [28]

นอกจากนี้ ในปัจจุบันคลื่นไมโครเวฟได้ถูกนำมาใช้งานทางด้านการศึกษาทางเคมี เรียกว่า Microwave assisted technique ซึ่งเป็นการใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยเร่งปฏิกิริยาทางเคมีให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น โดยหลักการที่นำมาใช้งานทางด้านการศึกษาทางเคมีสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ คือ

1. Electrical conductor and the charge carriers

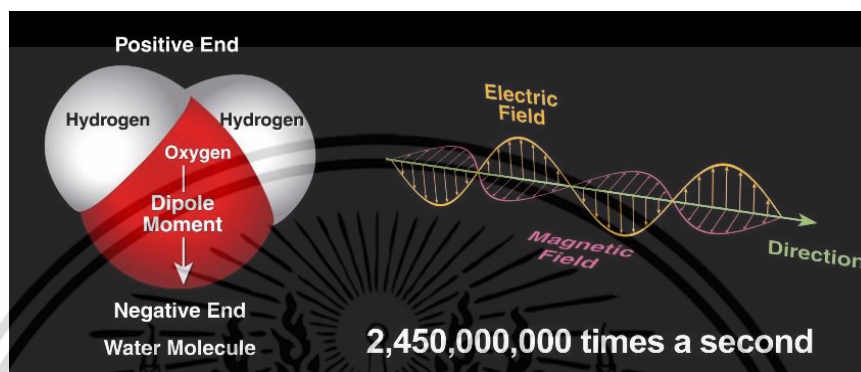
เป็นการให้คลื่นไมโครเวฟผ่านไปยังวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้า (Conductor) ได้ ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นวัสดุเกิดการเคลื่อนที่และถ่ายเทประจุอย่างรวดเร็ว และทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากความต้านทานในชั้นวัสดุ ซึ่งถ้าหากชั้นวัสดุมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีปฏิกิริยาก็จะสามารถเกิดได้รวดเร็วมากขึ้น หรือใช้เวลาประมาณ 10 – 18 วินาที เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟประมาณ 2.4 GHz ซึ่งเทคนิคนี้เหมาะกับการสังเคราะห์สารที่ไม่มีตัวทำละลายที่เป็นน้ำ

2. Dipolor mechanism

เป็นการทำให้เกิดความร้อนโดยให้คลื่นไมโครเวฟผ่านไปยังสารที่มีความเป็นไดอิเล็กทริก (Dielectric) หรือสารที่มีความเป็นขั้วสูง เนื่องจากโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีขั้วไฟฟ้า คือ มีประจุบวก และ ประจุลบที่ขั้วตรงกันข้าม เมื่อคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าผ่านเข้าไป โมเลกุลเหล่านี้ก็จะถูกเหนี่ยวนำและหมุนซ้ำเพื่อปรับเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าของคลื่น และคลื่นนี้เป็นสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงสลับไปมา ประมาณ 2,450,000,000 รอบ/วินาที จึงส่งผลให้โมเลกุลเหล่านี้หมุนกลับไปมา ทำให้เกิดความร้อนขึ้น ดังรูป 2.12 ซึ่งการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้จะมีประสิทธิภาพการเกิดความร้อนสูงสุด ในการให้ความร้อนแก่น้ำ และ ประสิทธิภาพต่ำ เมื่อให้ความร้อนแก่ ไขมัน น้ำตาล และ น้ำแข็ง



รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดการสั่นของสารไดอิเล็กทริก (น้ำ) เมื่อผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [29]

2.3.1 ข้อดีของการใช้เทคนิคไมโครเวฟในการสังเคราะห์สารอนุภาคระดับนาโน

เทคนิคทางไมโครเวฟได้ถูกนำมาใช้งานในด้านการสังเคราะห์ทางเคมีในห้องแลปมานานกว่า 25 ปี ถึงแม้ว่าจะยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ แต่ในปัจจุบันก็ได้มีการพัฒนาเทคนิคทางไมโครเวฟเพื่อใช้ในการสังเคราะห์สารประเภทต่างๆมากมาย โดยเฉพาะสารอนุภาคระดับนาโน ซึ่งข้อดีของการใช้เทคนิคทางไมโครเวฟในการสังเคราะห์สารอนุภาคระดับนาโน มีดังนี้

1. เทคนิคทางไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์สารอนุภาคระดับนาโนได้อย่างรวดเร็ว ภายในไม่กี่วินาที
2. เทคนิคทางไมโครเวฟสามารถเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้มากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น
3. เทคนิคทางไมโครเวฟสามารถควบคุมขนาดอนุภาคของสารระดับนาโนให้มีขนาดที่เท่ากันและไม่เกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration)
4. เทคนิคทางไมโครเวฟสามารถสังเคราะห์สารให้มีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนได้เนื่องจากการเกิดผลึกที่รวดเร็ว
5. เทคนิคทางไมโครเวฟเป็นเทคนิคที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และง่ายต่อการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

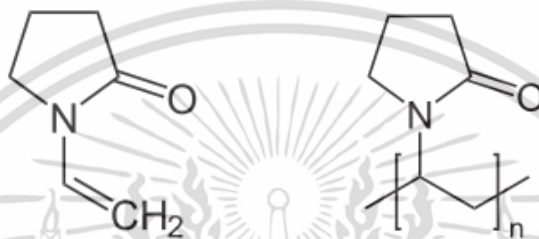
2.3.2 การใช้เทคนิคทางไมโครเวฟในการสังเคราะห์สารอนุภาคระดับนาโน

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารอนุภาคระดับนาโนอยู่มากมาย โดยเฉพาะอนุภาคซิลเวอร์นาโน เนื่องจาก สะดวก รวดเร็ว และได้สารอนุภาคระดับนาโนตามต้องการ ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ มีดังนี้

- งานวิจัยของ Siby J. และคณะได้ทำการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ โดยใช้เฮกซามีน (Hexamine) เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้สารไบโลพอลิเมอร์ แพคติน (Pactin) เป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพ ในการสังเคราะห์เริ่มจาก ผสมสารละลาย AgNO_3 กับ แพคติน แล้วนำไปผ่านการโซนิเคชัน เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นเติมเฮกซามีน ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ และทำการโซนิเคชัน เป็นเวลาอีก 15 นาที ขั้นสุดท้ายจะนำสารละลายที่ได้ไปผ่านกระบวนการทางไมโครเวฟ โดยงานวิจัยนี้ใช้เตาไมโครเวฟเป็นแหล่งให้พลังงาน ใช้กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ความถี่ 2450 MHz เป็นเวลา 5 นาที จะสามารถสังเกตเห็นสีของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปจากใสไม่มีสีเป็นสีน้ำตาล แสดงถึงการเกิดผลึกอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะของสารแขวนลอย ซึ่งขนาดอนุภาคที่ได้มีขนาดประมาณ 18.84 นาโนเมตร [5]
- งานวิจัยของ Oluwatobi S. และคณะได้ทำการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ โดยใช้เซลลูโลส (Cellulose) ที่สกัดได้จากผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) เป็นทั้งตัวรีดิวซ์และเพิ่มเสถียรภาพ เริ่มจากละลายเซลลูโลสในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการปรับค่า pH ให้เป็น 11 โดยใช้ NaOH 1M หลังจากนั้นผสมสารละลาย AgNO_3 และนำไปผ่านกระบวนการทางไมโครเวฟ โดยใช้เตาอบไมโครเวฟ กำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ ที่เวลาแตกต่างกัน จะได้สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 2.6 นาโนเมตร และจากการสังเคราะห์ที่เวลาแตกต่างกันพบว่ายิ่งเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์จะทำให้ได้สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น [30]

2.4 พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone, PVP)

พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone, PVP) จัดเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี โดยสายโซ่พอลิเมอร์จะประกอบด้วยหน่วยย่อยมอนอเมอร์ *N*-Vinylpyrrolidone (NVP) ที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์สองกลุ่ม คือ แลคตัม (Lactam) เป็นวงแหวนเอมไมด์ (Amide) ห้าเหลี่ยม และส่วนที่เป็นกลุ่มไวนิล (Vinyl group) ประกอบด้วยคาร์บอนสองอะตอม เชื่อมต่อกัน ทำให้พอลิไวนิลไพโรลิโดนมีความเป็น Amphiphilic คือ โมเลกุลมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) คือ กลุ่มเอมไมด์ และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) คือ เมทิลีน ในส่วนของ backbone ประกอบอยู่ด้วยกัน ซึ่งโครงสร้างของ *N*-Vinylpyrrolidone และ Polyvinylpyrrolidone แสดงดังรูป 2.14 และตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลไพโรลิโดน



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของ *N*-Vinylpyrrolidone (ซ้าย) และ Polyvinylpyrrolidone (ขวา) [31]

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลไพโรลิโดน [32]

สมบัติของพอลิไวนิลไพโรลิโดน	
สูตรเคมี	$(C_6H_9NO)_n$
มวลโมเลกุล	2.5 g/mol^{-1}
ลักษณะทางกายภาพ	มีสีขาวถึงเหลืองอ่อน ตูดความชื้นได้ เป็นผงอสัณฐาน
ความหนาแน่น	1.2 cm^3
จุดหลอมเหลว	150 ถึง 180 °C (302 ถึง 356 °F, 423 ถึง 453 °K) (อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว)

2.4.1 ข้อดีและการนำไปใช้งานของพอลิไวนิลไพโรลิโดน

ในปัจจุบันพอลิไวนิลไพโรลิโดนถูกนำมาใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย เนื่องจากมีความสามารถในการละลายที่ดี และมีความเป็นพิษต่ำ (Low toxicity) โดยตัวอย่างการใช้งานพอลิไวนิลไพโรลิโดน มีดังนี้ [33]

- อุตสาหกรรมกาว** เนื่องจากพอลิไวนิลไพโรลิโดนมีความหนืดและมีความสามารถในการละลายที่ดี จึงนิยมใช้เป็นสารยึดติดเข้ากับวัสดุต่างๆ ได้ เช่น สารยึดติดโลหะกับพอลิเมอร์ ยึดติดกระจก หรือใช้ทำเป็นกาวแห้ง เป็นต้น
- อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์** พอลิไวนิลไพโรลิโดนได้รับการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา สหรัฐอเมริกาว่าสามารถนำมาใช้งานทางด้านอาหารและยาได้ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ สามารถสัมผัสกับมนุษย์ได้โดยตรง เช่น ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร หรือแคปซูลยา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **อุตสาหกรรมกระดาษ** ใช้เป็นส่วนประกอบในการทำกระดาษเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Strength) ป้องกันการเลื่อนไถล (Prevents sliding) เพิ่มความสว่างให้กระดาษ (Fluorescent whitening agent carrier)
4. **อุตสาหกรรมหมึก** ใช้ทำน้ำหมึกหรือสารเคลือบต่างๆ เนื่องจากควบคุมความหนืดได้ง่าย (Viscosity control) ทำให้สารแขวนลอยได้ดี (suspension stabilization) และควบคุมการไหลได้ง่าย (Flow control)

2.4.2 การใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดนในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์

นอกจากพอลิไวนิลไพโรลิโดนจะถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆแล้ว ปัจจุบันได้มีการใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดนมาเป็นสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ ในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยไนโตรเจน (Nitrogen atom) และ ออกซิเจน (Oxygen atom) ที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Lone pair electron) จึงสามารถให้อิเล็กตรอนแก่ซิลเวอร์ไอออนได้ ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงดังนี้

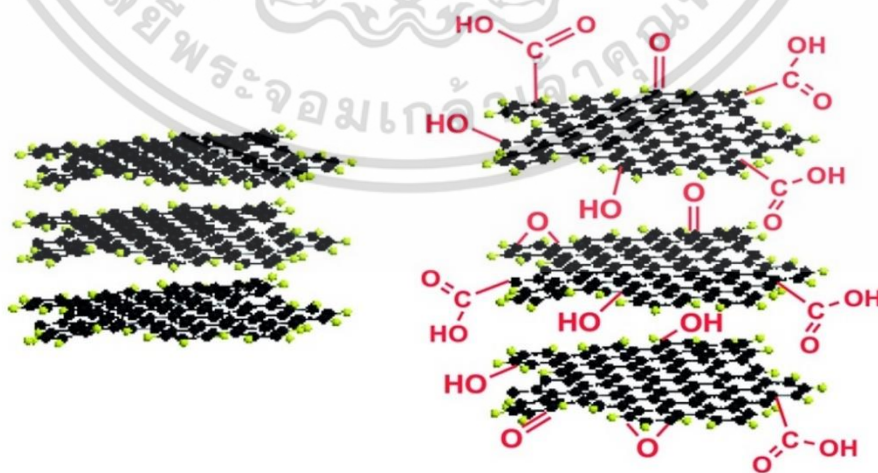
- งานวิจัยของ Steve Lien-Chung Hsu และคณะได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธี sintering และใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เป็นสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ โดยเริ่มจากผสมสารละลาย AgNO_3 กับ PVP และปั่นกวน หลังจากนั้นผสมสารละลาย HCHO และค่อยๆหยด triethylamine ลงในสารละลาย สีของสารจะเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีดำ และปั่นกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 200 นาที หลังจากนั้นล้างตะกอนที่ได้ด้วยเอทานอล และนำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิตั้งในสุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผงสารที่ได้จะนำมากระจายตัวใหม่ใน α -terpineol ซึ่งขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ได้มีขนาดประมาณ 15 นาโนเมตร [34]
- งานวิจัยของ Malina D. และคณะได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธี Chemical reduction โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เป็นสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ เริ่มจากผสม AgNO_3 0.039 กรัม ลงในสารละลาย PVP 95 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนจะได้สารละลายส่วนแรก ในสารละลายส่วนที่สองจะผสมสารละลายระหว่าง NaBH_4 กับ AgNO_3 ในอัตราส่วนโดยโมล 0.39 กับสารละลาย PVP 5 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นค่อยๆหยดสารละลายส่วนที่สองลงในสารละลายส่วนแรกด้วยอัตรา 1 หยด/วินาที ปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที จะสังเกตเห็นสีเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลือง หลังจากนั้นนำสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโนที่ได้นำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง 13000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลนสารละลายใสออก และนำตะกอนที่ได้ไปกระจายตัวใหม่ (Re-dispersion) ในน้ำกลั่น จะได้สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 19 – 83 นาโนเมตร [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide)

กราฟีน (Graphene) เป็นอีกรูปหนึ่งของสารคาร์บอนมีลักษณะเป็นแผ่นบาง 2 มิติ ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent) ลักษณะคล้ายกับรังผึ้ง และเหมือนกับชั้นคาร์บอนของกราไฟต์ (Graphite) ที่ถูกแยกออกจากกัน ซึ่งความหนาในอุดมคติของแผ่นกราฟีนอยู่ที่ 0.335 นาโนเมตร กราฟีนถูกค้นพบโดยกลุ่มนักฟิสิกส์จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ (Manchester University) ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 2004 โดย Andre Geim และ Kostya Novoselov โดยการลอกชั้นของกราไฟต์ หรือผงดินสอที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ด้วยเทคนิคที่ทำให้แผ่นแยกออกจากกันทีละชั้น ซึ่งทำให้แผ่นกราฟีนที่ได้มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีเป็นอย่างมาก เนื่องจากคาร์บอนแต่ละอะตอมในแผ่นของกราฟีนเกิดพันธะเชื่อมต่อกันสามพันธะ ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระ (Pi electron) เหลืออยู่อิเล็กตรอนเหล่านั้นจึงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและไม่มีการชนกันของอนุภาค เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบบอลลิสติก (Ballistic transport) ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดงถึง 4 เท่า นอกจากนี้กราฟีนยังมีสมบัติทางเชิงกลที่ดีเยี่ยม เนื่องจากพันธะของคาร์บอนแต่ละอะตอมสามารถยืดได้ถึง 0.142 เมตร ทำให้กราฟีนมีค่า Tensile strength มาถึง 130,000,000,000 ปาสคาล ซึ่งแข็งแรงกว่าเหล็กมากถึง 200 เท่า และถือได้ว่าเป็นวัสดุที่แข็งแรงที่สุดในปัจจุบัน

กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) มีลักษณะคล้ายแผ่นกราฟีนเกิดจากการออกซิไดซ์ (Oxidized) กราไฟต์ทำให้มีหมู่ของออกซิเจนที่คาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปหลังจากผ่านกระบวนการออกซิไดซ์จะเรียกว่า กราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) เนื่องจากหมู่ของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นมาจะช่วยให้ระยะห่างระหว่างชั้นของกราไฟต์เพิ่มมากขึ้นแต่ยังไม่ทำให้แต่ละชั้นหลุดออกจากกัน ซึ่งต้องนำไปผ่านกระบวนการโซนิเคชัน (Sonication) เพื่อแยกชั้นของกราไฟต์ออกไซด์ออก ในปัจจุบันกราฟีนออกไซด์นิยมนำมาใช้ในงานในด้านการสังเคราะห์ทางเคมีมากมาย เนื่องจากกราฟีนออกไซด์สามารถในการละลายได้ดีน้ำหรือตัวทำละลายที่มีขั้ว ทำให้กราฟีนออกไซด์สามารถเข้ากับสารชนิดต่างๆได้ง่าย สามารถเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติทางเชิงกลแก่วัสดุได้ดี ซึ่งลักษณะของกราฟีน และกราฟีนออกไซด์ แสดงดังรูป 2.14 [36]

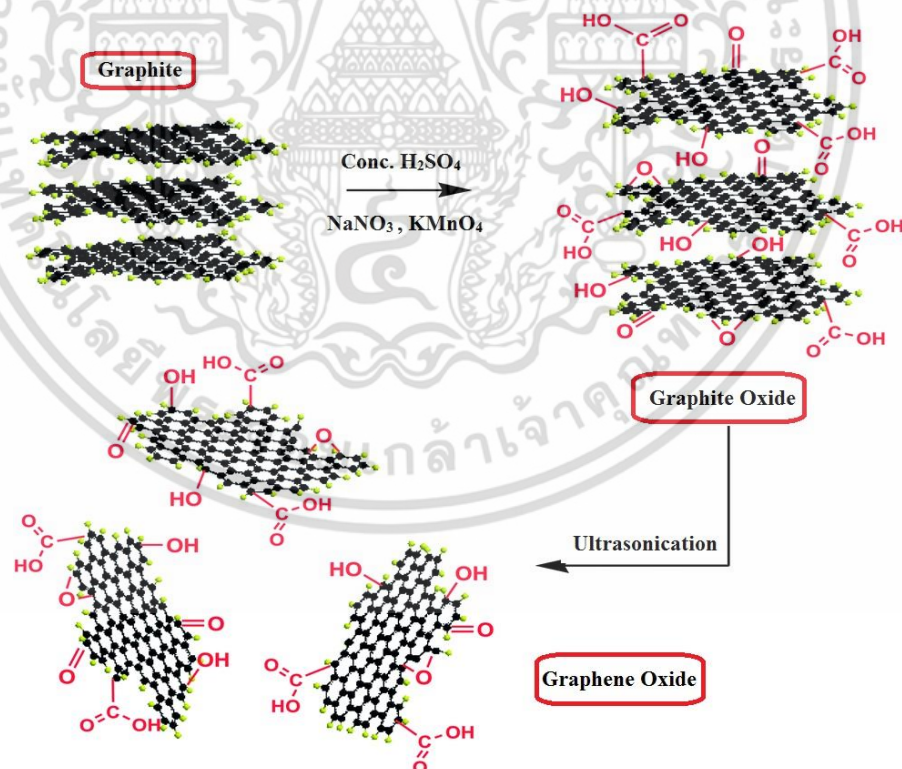


รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของ Graphene (ซ้าย) และ Graphene oxide (ขวา) [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์

การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์โดยทั่วไปจะเริ่มต้นจากการสังเคราะห์กราฟไฟต์ออกไซด์ด้วยเทคนิค Hummer's method ซึ่งกราฟไฟต์ออกไซด์เริ่มมีการสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1958 โดย William S. Hummer และ Richard E. Offeman โดยการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ซึ่งเป็นสาร Oxidizing agent ที่รุนแรงลงไปในการละลายกราฟไฟต์ที่ผสมโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งข้อดีของการเตรียมกราฟไฟต์ออกไซด์ด้วยเทคนิคนี้คือ ง่าย รวดเร็ว และไม่เป็นอันตราย เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นจะไม่เกิน $98\text{ }^\circ\text{C}$ จึงไม่ทำให้เกิดการระเบิดเกิดขึ้น ซึ่งขั้นตอนการเตรียมกราฟไฟต์ออกไซด์โดยทั่วไปด้วยเทคนิค Hummer's method เริ่มจากผสมของผสมระหว่าง ผงกราฟไฟต์ 100 กรัม กับ โซเดียมไนเตรต 50 กรัม ในกรดซัลฟิวริก ที่อุณหภูมิ $0\text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 300 กรัม ลงในของผสม และทำการปั่นกวน หลังจากนั้นผสมนำลงไปให้ได้ปริมาตร 32 ลิตร จะได้ของแข็งกราฟไฟต์ออกไซด์ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และในขั้นตอนสุดท้ายจะกำจัดสิ่งเจือปนและน้ำด้วยฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (Phosphorus pentoxide) และทำให้แห้งจะได้ผงของกราฟไฟต์ออกไซด์ หลังจากนั้นจึงนำสารละลายกราฟไฟต์ออกไซด์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการโซนิเคชัน (Sonication) เพื่อที่จะแยกชั้นของกราฟไฟต์ออกไซด์ออกมาจึงจะได้เป็นกราฟีนออกไซด์ ซึ่งขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค Hummer's method แสดงดังรูป 2.14 [38]



รูปที่ 2.16 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค Hummer's method [38]

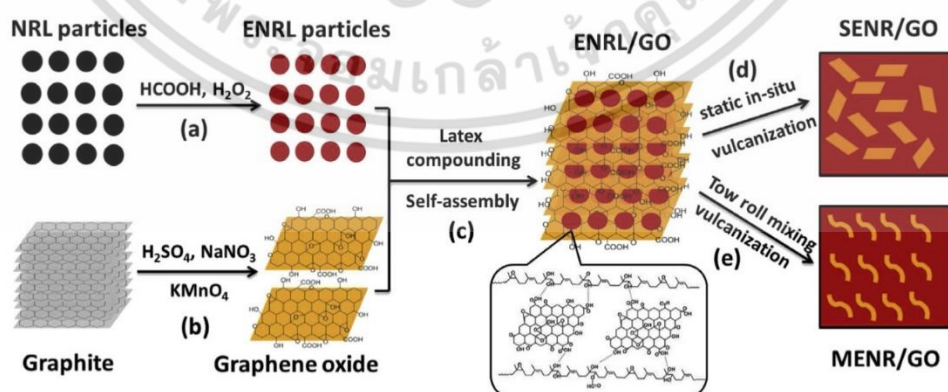
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 สมบัติของกราฟีนออกไซด์

เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีหมู่ออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างอยู่มาก จึงทำให้กราฟีนออกไซด์มีข้อได้เปรียบในด้านการกระจายตัว (Dispersion) ในสารละลายที่เป็นน้ำหรือสารออกแกนิค (Organic solvent) ได้ดีกว่ากราฟีน ในปัจจุบันจึงได้มีการนำกราฟีนออกไซด์มาใช้เป็นตัวช่วยเสริมสมบัติให้กับวัสดุ เช่น วัสดุทางเซรามิกซ์ (Ceramic material) และวัสดุทางพอลิเมอร์ (Polymer material) ทั้งในด้านสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล แต่เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีหมู่ออกซิเจนอยู่มากจึงทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่พันธะ sp^2 จึงทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ลดลงหรือเรียกได้ว่ามีความเป็นฉนวน (Insulator) มากขึ้น และนอกจากนี้สมบัติเชิงแสง (Optical properties) และการนำไปใช้งานต่างๆ ของกราฟีนออกไซด์จะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้าง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันสามารถปรับเปลี่ยนด้วยวิธีทางเคมีให้มีสมบัติตามที่ต้องการได้ เช่น แทนที่หมู่ฟังก์ชันด้วยหมู่เอมีน (Ammine) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายและการนำไปใช้งานทางด้านทางการแพทย์ได้

และเนื่องจากกราฟีนและกราฟีนออกไซด์ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สุดในโลก คือมีค่า Young's modulus มากถึง 13,000,000,000 ปาสคาล ซึ่งมากกว่าเหล็กถึง 200 เท่า ปัจจุบันจึงนิยมนำกราฟีนออกไซด์มาผสมกับวัสดุชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและสมบัติทางเชิงกลให้แข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยตัวอย่างงานวิจัยที่นำกราฟีนออกไซด์มาใช้เป็นตัวช่วยเสริมแรงในวัสดุสามารถแสดงได้ดังนี้

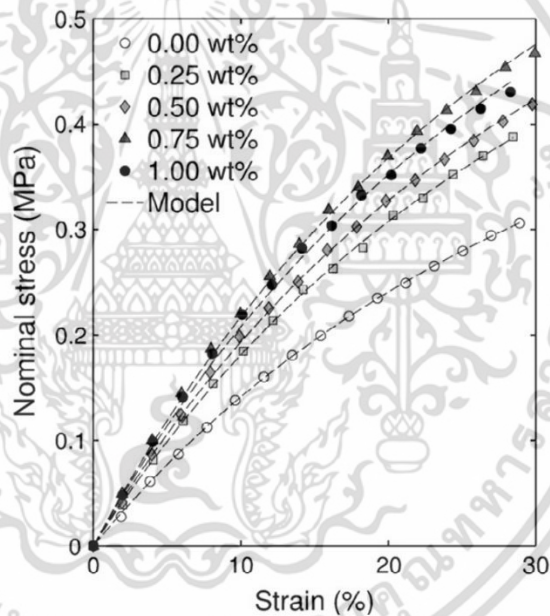
- งานวิจัยของ Xiaodong she และคณะได้ทำการศึกษาศักยภาพการสังเคราะห์แผ่นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural rubber, ENR) ผสมกราฟีนออกไซด์ เพื่อศึกษาการเพิ่มสมบัติทางเชิงกลให้กับแผ่นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ซึ่งขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.17 พบว่าหมู่อีพอกไซด์และหมู่ไฮดรอกซิลในเนื้อยางธรรมชาติอีพอกไซด์ สามารถเกิดพันธะกับหมู่ออกซิเจนในแผ่นกราฟีนออกไซด์ได้ดี จึงทำให้แผ่นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ผสมกราฟีนออกไซด์ ที่ปริมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า Tensile strenght มากกว่าแผ่นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ไม่ได้เติมกราฟีนออกไซด์ มากถึง 87 % [39]



รูปที่ 2.17 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมกราฟีนออกไซด์ (ENR) [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งานวิจัยของ D.C. stanier และคณะได้ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโน (Graphene oxide nanoplatelets) เพื่อศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพทางเชิงกล (Mechanical properties) ของแผ่นยางผสม โดยการเตรียมจะใช้วิธีผสมและเทขึ้นรูปอย่างง่าย โดยเริ่มจากผสมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโน (สังเคราะห์ได้จากเทคนิค Hummer's method) ด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน คือ 0 0.25 0.50 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับน้ำยางธรรมชาติ 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยการสั่น หลังจากนั้นทำการเทขึ้นรูปในจากเพาะเชื้อ ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แยกออกจากแบบจะได้แผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโน ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพทางเชิงกลพบว่า ค่า Young's modulus ของแผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกราฟีนออกไซด์ที่ผสมลงไป คือ 0 0.25 0.50 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.18 [8]



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟ Tensile strenght ของแผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโนที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ [8]

2.6 เชื้อแบคทีเรีย

แบคทีเรีย (Bacteria) จัดเป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าจึงต้องให้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงในการสังเกต ซึ่งแบคทีเรียจัดเป็นพวกจุลินทรีย์ประเภทเซลล์เดียว เรียกว่า โปรคาริโอต มีผนังเซลล์ที่คงรูป (Rigid cell wall) ทำให้รักษารูปร่างได้ และมีรูปร่างได้หลายแบบทั้งมีเพศและไม่มีเพศ โดยแบบมีเพศจะเกิดจากการรวมตัวกันของเซลล์ 2 เซลล์ ส่วนการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศจะเป็นแบบการแตกหน่อ (Budding) ซึ่งแบคทีเรียเป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปไม่ว่าจะเป็น ดิน น้ำ อากาศ มีทั้งชนิดที่ให้ประโยชน์และเป็นโทษ โดยแบคทีเรียสามารถแบ่งได้หลายแบบ [40] เช่น

1. แบ่งตามการติดสีย้อมแกรม (Gram stain) ซึ่งถ้าติดสีน้ำเงินจะเรียกว่า แบคทีเรียชนิดแกรมบวก (Gram positive bacteria) แต่ถ้าติดสีแดงจะเรียกว่า แบคทีเรียชนิดแกรมลบ (Gram negative bacteria)
2. แบ่งตามรูปร่างของแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียรูปร่างกลมเรียกว่า คอคคัส (Coccus) แบคทีเรียรูปร่างเป็นแท่งเรียกว่า บาซิลลัส (Bacillus) เป็นต้น
3. แบ่งตามการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรีย แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตเรียกว่า แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) และแบคทีเรียที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตเรียกว่า แอนแอโรบิกแบคทีเรีย (Anaerobic bacteria) เป็นต้น

2.6.1 องค์ประกอบของแบคทีเรีย

องค์ประกอบหลักของแบคทีเรียสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) ผนังเซลล์

ผนังเซลล์ (Cell wall) ส่วนที่แข็งที่สุดของเซลล์ มีส่วนประกอบของผนังเซลล์แตกต่างกันในกลุ่มของแบคทีเรีย ส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์คือ ชั้นเปปทิโดไกลแคนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ Glycan โดยชั้นของเปปทิโดไกลแคนเป็นส่วนที่ถูกทำลายด้วยยาปฏิชีวนะบางชนิดได้ง่ายเช่น ยาเพนิซิลิน และ Cephalosporin เป็นต้น รวมทั้งถูกทำลายด้วยสาร Disinfectants เช่น แอลกอฮอล์ และพวก Detergent เอนไซม์ Lysozyme ก็สามารถย่อยชั้นเปปทิโดไกลแคนได้ หน้าที่ของผนังเซลล์ส่วนใหญ่ทำหน้าที่ป้องกันเซลล์จากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น แรงดันออสโมซิส สารที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ และหน้าที่ให้เซลล์คงรูปร่างอยู่ได้ นอกจากนี้ยังพบว่า Porin protein ในแบคทีเรียแกรมลบช่วยป้องกันสารที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ เช่น ยาปฏิชีวนะบางชนิดไม่ให้เข้าสู่เซลล์ รวมทั้งสารเคมีบางชนิดด้วย

ความแตกต่างของโครงสร้างผนังเซลล์ Gram stain เป็นการย้อมสีเซลล์แบคทีเรียที่บอกความแตกต่างของโครงสร้างผนังเซลล์ได้ดี โดยการย้อมสีวิธีนี้ทำให้แยกแบคทีเรียได้เป็น 2 กลุ่ม ตามปฏิกิริยาการติดสี ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวก เซลล์ติดสีม่วงของคริสตัลไวโอเล็ตซึ่งเป็นสีย้อมสีแรก (Primary stain) กับแบคทีเรียแกรมลบ เซลล์ติดสีแดงของ Safranin O ซึ่งเป็นสีย้อมสีที่ 2 หรือสีย้อมทับ (Secondary stain หรือ Counterstain) ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกจะมีชั้น เปปทิโดไกลแคนที่หนา มีสาร Teichoic acid และ Lipoteichoic acid ยึดติดกับชั้นเปปทิโดไกลแคน ไม่มีชั้น

Outer membrane ส่วนผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบจะมีชั้นเปปทิโดไกลแคนบาง ไม่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Teichoic และ Lipoteichoic acid แต่จะมีชั้น Outer membrane หุ้มอยู่ภายนอกชั้น เปปติโดไกลแคนชั้น Outer membrane ประกอบด้วยสาร Lipopolysaccharide Lipoprotein และพวก Porin protein เปรียบเทียบความแตกต่างของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบในตารางที่ 2.6 และรูปที่ 2.19

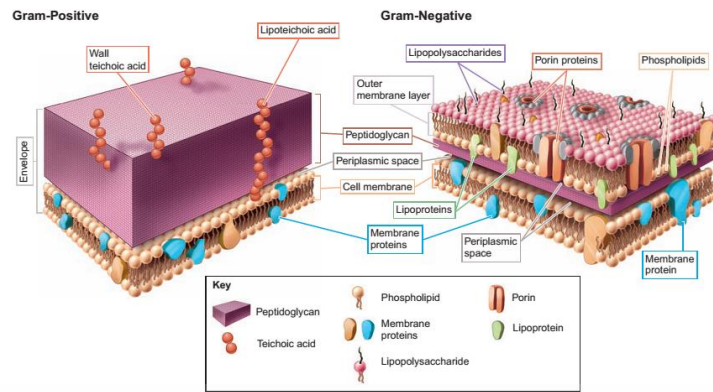
ตารางที่ 2.6 แสดงความแตกต่างของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ

คุณลักษณะ	แบคทีเรียแกรมบวก	แบคทีเรียแกรมลบ
1. จำนวนชั้น	1	2
2. องค์ประกอบทางเคมี	ชั้น Peptidoglycan - NAM, NAG, Amino acid - Teichoic acid - Lipoteichoic acid	ชั้น Outer membrane - Lipopolysaccharide - Lipoprotein ชั้น Peptidoglycan - NAM, NAG, Amino acid
3. ความหนาของชั้น Peptidoglycan	ประมาณ 20-80 นาโนเมตร	ประมาณ 8-10 นาโนเมตร
4. Outer membrane	ไม่มี	มี
5. Periplasmic space (ชั้นระหว่าง Peptidoglycan กับ Cell membrane)	แคบ	กว้าง
6. Porin protein	ไม่มี	มี

2) เยื่อหุ้มเซลล์

เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) เป็นส่วนประกอบอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญสำหรับแบคทีเรียที่อยู่ถัดจากผนังเซลล์โดยมี เพอริพลาสมิก-เมมเบรน (Periplasmic membrane) คั่นกลาง ทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนของไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) ทั้งหมด หน้าที่หลักของเยื่อหุ้มเซลล์เป็นทางเข้า-ออก ของแร่ธาตุสารอาหารจากภายนอกเข้าสู่ภายในและจากภายในออกสู่ภายนอก และพบว่าเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียเป็นบริเวณที่สำคัญสำหรับกระบวนการเมแทบอลิซึม โดยมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ การย่อยสลายสารอาหาร และสร้างพลังงาน รวมทั้งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เกิดบริเวณนี้ด้วย นอกจากนี้ เยื่อหุ้มยังทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน ยอมให้เฉพาะสารที่เซลล์ต้องการหรือจำเป็นต้องใช้เท่านั้นผ่านเข้าออกได้ การแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เกิดขึ้นได้ดีกับสารที่ละลายในไขมันได้ดี ส่วนสารอื่น ๆ เช่น ธาตุอาหาร เกลือ น้ำตาล ที่แพร่เข้าเซลล์ไม่ได้ จะใช้การขนส่งผ่านโปรตีนที่เยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นได้ทั้งแบบที่ใช้พลังงานและไม่ใช้พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



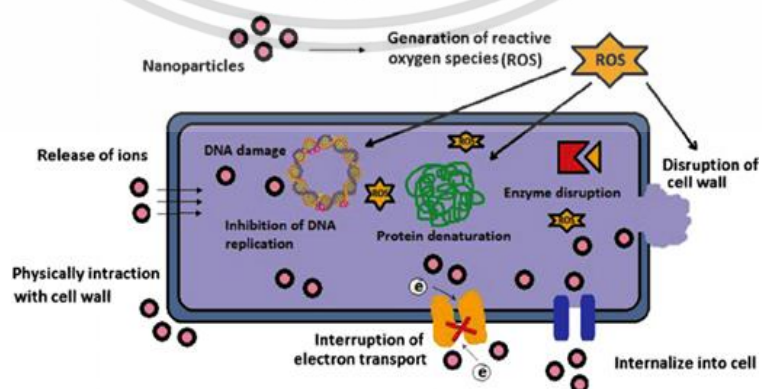
รูปที่ 2.19 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก (ซ้าย) และแบคทีเรียแกรมลบ (ขวา) [41]

2.6.2 กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์

กลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีประจุบวก (Ag^+) เมื่อสัมผัสกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียหรือเชื้อราจะสามารถแพร่กระจายประจุไปเกาะตามผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรียทำให้เกิดภาวะการรวมตัวของ DNA (Condensation) ภายในเซลล์ทำให้ประจุบวกของซิลเวอร์ (Ag^+) เข้าไปจับกับเอนไซม์โปรตีนเนส (Proteinase) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบเมตาบอลิซึมของเซลล์ซึ่งจะจับกับหมู่ซัลไฟดริล (-SH) ที่มีอะตอมของซัลเฟอร์ (S) เป็นองค์ประกอบซึ่งมีประจุเป็นลบ (S^{2-}) และทำให้เกิดกระบวนการทำงานของเอนไซม์หยุดการทำงานจนกระทั่งเซลล์แบคทีเรียหยุดการเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพตายในที่สุด

ดังนั้นกลไกการทำงานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์มี 3 ตามขั้นตอนดังนี้

- 1) อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในช่วง 1–10 nm จับกับผิวหน้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียและรบกวนการทำงานของระดับเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น การขนส่งสารเข้าออกจากเซลล์และการหายใจ
- 2) อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถแทรกเข้าไปภายในเซลล์แบคทีเรียและรบกวนการทำงานของระดับโมเลกุลโดยจับกับสารที่มีซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) เป็นองค์ประกอบเช่น DNA
- 3) อนุภาคนาโนซิลเวอร์เกิดการสลายตัวและปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดเล็กและมีเป็นจำนวนมากทำให้สามารถปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ออกมาด้วยความเข้มข้นสูงสามารถฆ่าแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว [42]



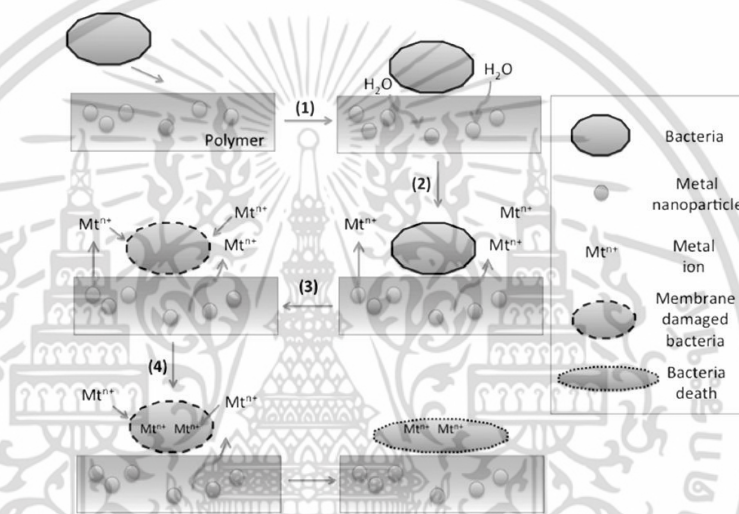
รูปที่ 2.20 แสดงกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ($AgNPs$) [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 กลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์/โลหะนาโนคอมโพสิต

กลไกการต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมพอลิเมอร์ (Polymer composite) ที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ หรือโลหะอนุภาคระดับนาโน โดยทั่วไปแสดงขั้นตอนได้ดังนี้

1. แบคทีเรียถูกดูดซับบนพื้นผิว ซึ่งสัมผัสกับความชื้นในอากาศ
2. ความชื้น (น้ำ) เหนี่ยวนำให้อนุภาคโลหะที่อยู่บนพื้นผิวหรือเมทริกซ์ของพอลิเมอร์เกิดกระบวนการปลดปล่อยไอออนและซึมผ่านออกมา
3. ไอออนของโลหะจะเข้าไปทำลายผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย
4. หลังจากนั้น ไอออนของโลหะ แพร่เข้าไปในภายในเซลล์ของแบคทีเรียและไอออนของโลหะเข้าไปยับยั้ง กระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการหายใจ การสังเคราะห์อาหาร
5. แบคทีเรียจึงตายไปในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมพอลิเมอร์ (Polymer composite) ที่ประกอบด้วยโลหะอนุภาคระดับนาโน [43]

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของอนุภาคนาโนซิลเวอร์เพื่อใช้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในลักษณะต่างๆ แสดงตัวอย่างงานวิจัยได้ดังนี้

- งานวิจัยของ Piotr K. และคณะได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุผสมพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (PS/Ag@PS) ในลักษณะ Core-shell เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยการสังเคราะห์เริ่มจากสังเคราะห์ส่วนแกนกลางหรือ Core โดยใช้เทคนิค Nitroxide coated เพื่อให้ Nitroxide ล้อมรอบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ จะได้เป็น N-AgNPs หลังจากนั้นจะนำส่วน Core ที่ได้ผสมกับพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Thermoforming ที่อุณหภูมิ 140 °C จะได้วัสดุผสม PS/Ag@PS และนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *P. aeruginosa* และ *S. aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบกับแกรมบวกตามลำดับ ซึ่งพบว่าวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดเนื่องจากมีอนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yun Haeng Joe [45] และคณะ ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในแผ่นกรองอากาศและการดักจับฝุ่นของแผ่นกรองซึ่งตัวอย่างในการทดลองที่ใช้คือแผ่นกรอง HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) ที่มีการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Silver deposited HEPA filter) เมื่อทำการทดลองใส่ฝุ่นให้ผ่านไปยัง Filter ที่ผ่านการเคลือบด้วยนาโนซิลเวอร์พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่า Pressure drop ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่มีค่าการดักจับฝุ่นสูงขึ้นนอกจากนี้ในการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิดในการทดสอบคือ *Escherichia coli* (*E. coli*) ชนิดแกรมแบคทีเรียประจุลบ (Gram negative bacteria) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ชนิดแกรมแบคทีเรียประจุบวก (Gram positive bacteria) ผลการทดลองพบว่าเชื้อแบคทีเรียลดลงในบริเวณที่มีการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณเส้นใยที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่น้อยกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณการลดลงของเชื้อ *S. aureus* จะลดลงเร็วกว่าชนิด *E. coli* จากผลงานการวิจัยจึงสามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกรองอากาศและเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาคุณภาพของ Filter เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป

Malina D. [35] และคณะได้ทำการศึกษากการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธี Chemical reduction โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เป็นสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ เริ่มจากผสม AgNO_3 0.039 กรัม ลงในสารละลาย PVP 95 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนจะได้สารละลายส่วนแรก ในสารละลายส่วนที่สองจะผสมสารละลายระหว่าง NaBH_4 กับ AgNO_3 ในอัตราส่วโดยโมล 0.39 กับสารละลาย PVP 5 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นค่อยๆหยดสารละลายส่วนที่สองลงในสารละลายส่วนแรกด้วยอัตรา 1 หยด/วินาที ปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที จะสังเกตเห็นสีเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลือง หลังจากนั้นนำสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโนที่ได้นำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง 13000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นลนสารละลายใสออก และนำตะกอนที่ได้ไปกระจายตัวใหม่ (Re-dispersion) ในน้ำกลั่น จะได้สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 19 – 83 นาโนเมตร

C. Diaz-Cruz [46] และคณะได้ทำการศึกษากการสังเคราะห์สารอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโน (AgNPs) โดยใช้สารพอลิเมอร์ชนิด พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และ พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) เพื่อเป็นทั้งตัวให้อิเล็กตรอน (Reductant) และสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) ให้กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยจะแบ่งการสังเคราะห์เป็นสองส่วน คือ การสังเคราะห์โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และ การสังเคราะห์โดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ในส่วนที่ใช้ PVA เริ่มจากละลาย PVA ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นค่อยๆหยด AgNO_3 ลงในสารละลาย PVA และทำการปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้ไปทำการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ล้างตะกอนออกมาและนำไปกรองด้วยไนลอนเมมเบรน ขนาด 0.2 ไมโครเมตร นำของแข็งที่ได้ไปล้างด้วย เอทานอล (Ethanol) และน้ำกลั่น ในส่วนของการเตรียม AgNPs โดยใช้ PEG จะเหมือนกับวิธีข้างต้น แต่ในส่วนของการละลาย PEG จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ต้องให้ความร้อนขณะละลาย ซึ่งผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ได้พบว่า AgNPs ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ PVA และ PEG เพื่อเป็นทั้งตัวให้อิเล็กตรอน (Reductant) และสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) จะกระกายตัวได้ดีและสม่ำเสมอ โดยขนาดอนุภาคที่ได้อยู่ที่ประมาณ 20 นาโนเมตร

Monir Noroozi [47] และคณะ ได้ศึกษาการสร้างอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีโครงสร้างเป็นทรงกลมและรูปร่างกึ่งไม้ได้อย่างรวดเร็วและไม่เป็นพิษ โดยการฉายรังสีไมโครเวฟ ซึ่งปราศจากการใช้ตัวรีดิวซ์อื่นๆ โดยทดสอบเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีไมโครเวฟ การสร้างอนุภาคนาโนซิลเวอร์สร้างได้โดยการรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนในน้ำที่เป็นกลาง และใช้พอลิไวนิลไพโรลลิโดนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ และจะนำมาเปรียบเทียบกับสารสังเคราะห์โดยวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม การวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrometry) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การวัดค่าการดูดกลืนแสงของอะตอม (AAS) และการวัดขนาดของอนุภาคโดยการกระเจิงแสง (PCS) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการฉายรังสี ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคดีขึ้น และขนาดอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย รวมถึงซิลเวอร์อนุภาคขนาดใหญ่จะหายไปจากความเข้มข้นสูง และการโตของโครงสร้างอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปรากฏขึ้นเป็นรูปกึ่งไม้

Piotr K. [45] และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุผสมพอลิไวดรีนกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (PS/Ag@PS) ในลักษณะ Core-shell เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยการสังเคราะห์เริ่มจากสังเคราะห์ส่วนแกนกลางหรือ Core โดยใช้เทคนิค Nitroxide coated เพื่อให้ Nitroxide ล้อมรอบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ จะได้เป็น N-AgNPs หลังจากนั้นจะนำส่วน Core ที่ได้ผสมกับพอลิไวดรีนด้วยเทคนิค Thermoforming ที่อุณหภูมิ 140 °C จะได้วัสดุผสม PS/Ag@PS และนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *P. aeruginosa* และ *S. aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบกับแกรมบวกตามลำดับ ซึ่งพบว่าวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดเนื่องจากมีอนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ [2]

K. B. Narayanan [48] และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุผสมพอลิเมอร์ (PVA/SA/AgNPs) ในลักษณะที่เป็นเม็ด (Beads) ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่าง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) กับ โซเดียมอัลจอนเนต (Sodium alginate) และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (AgNPs) โดยทำให้อยู่ในลักษณะ Crosslink กับ Ca^{2+} เพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสม ขั้นตอนการสังเคราะห์เริ่มจากละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 90 °C หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นผสม Sodium alginate ปั่นกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 50 °C และผสมซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) ลงไปในสารละลายและปั่นกวนในที่มืดอีกเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้หยดลงในสารละลายที่ผสมระหว่าง $CaCl_2$ กับ $NaBH_4$ จากนั้นนำไปกรองและนำเม็ดปืท PVA/SA/AgNPs ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้เทคนิค Freeze thaw process เพื่อทำให้เกิด Ca^{2+} crosslink ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งในส่วนของการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสม PVA/SA/AgNPs พบว่ามีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D.C. stanier [8] และคณะได้ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโน (Graphene oxide nanoplatelets) เพื่อศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพทางเชิงกล (Mechanical properties) ของแผ่นยางผสม โดยการเตรียมจะใช้วิธีการผสมและเทขึ้นรูปอย่างง่าย โดยเริ่มจากผสมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโน (สังเคราะห์ได้จากเทคนิค Hummer's method) ด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน คือ 0 0.25 0.50 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ กับน้ำยางธรรมชาติ 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยการสั่น หลังจากนั้นทำการเทขึ้นรูปในจากเพาะเชื้อ ทั้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แกะออกจากแบบจะได้แผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโน ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพทางเชิงกลพบว่า ค่า Young's modulus ของแผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ขนาดแผ่นระดับนาโนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกราฟีนออกไซด์ที่ผสมลงไป คือ 0 0.25 0.50 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate; AgNO_3) ผลิตโดย Merck-chemicals, Analysis
2. พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP มวลโมเลกุลเฉลี่ย 40,000) ผลิตโดย SIGMA-ALDRICH
3. น้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น (Concentrated Natural Rubber; NR) ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก ชนิด High ammonia
4. สารละลายแอมโมเนีย (Ammonia solution; NH_4OH) เข้มข้น 28 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดย CARLO ERBA
5. ผงกราไฟท์ (Graphite Powder, มวลโมเลกุล 12.01 กรัมต่อโมล) ผลิตโดย SIGMA-ALDRICH
6. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium Permanganate; KMnO_4) ผลิตโดย CARLO ERBA
7. กรดซัลฟิวริก (Sulphuric Acid; H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก ผลิตโดย CARLO ERBA
8. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid; HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ผลิตโดย CARLO ERBA
9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide; H_2O_2) ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ผลิตโดย CARLO ERBA
10. แอซีโตน (Acetone; $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)
11. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องแก้ว
2. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
3. กระจกน้ำกลั่น (Distilled Water)
4. ไมโครปิเปต (Micropipette)
5. ขวดแก้วเล็ก (Vial)
6. ตู้ดูดควัน (Fume Hood)
7. ตู้อบลมร้อน (Oven) : Serial no.8 502.0552, MEMMERT, Germany
8. เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง
9. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน
10. เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven) ผลิตโดย SAMSUNG รุ่น MG23F301EAS
11. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) Shimadzu รุ่น XRD-6100
12. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์ (Attenuated Reflection Fourier-Transform Infrared; ATR-FTIR) Thermo Fisher Scientific Inc., USA รุ่น Nicolet iS50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer) รุ่น DXR Smart
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) JEOL-JSM5800LV, Japan
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) JEOL- JM-2010, Japan
16. อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) Oxford ISIS 300
17. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer; UV-vis) รุ่น Evolution 201
18. เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Gravity Analysis; TGA) รุ่น Mettler, Toledo, USA
19. เครื่องทดสอบประสิทธิภาพเชิงกล (Universal Testing Machine; UTM) รุ่น LR5K, LLYOD

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการแบ่งการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ศึกษาวิจัยออกเป็น 3 หัวข้อหลัก ดังนี้

3.3.1 การศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน

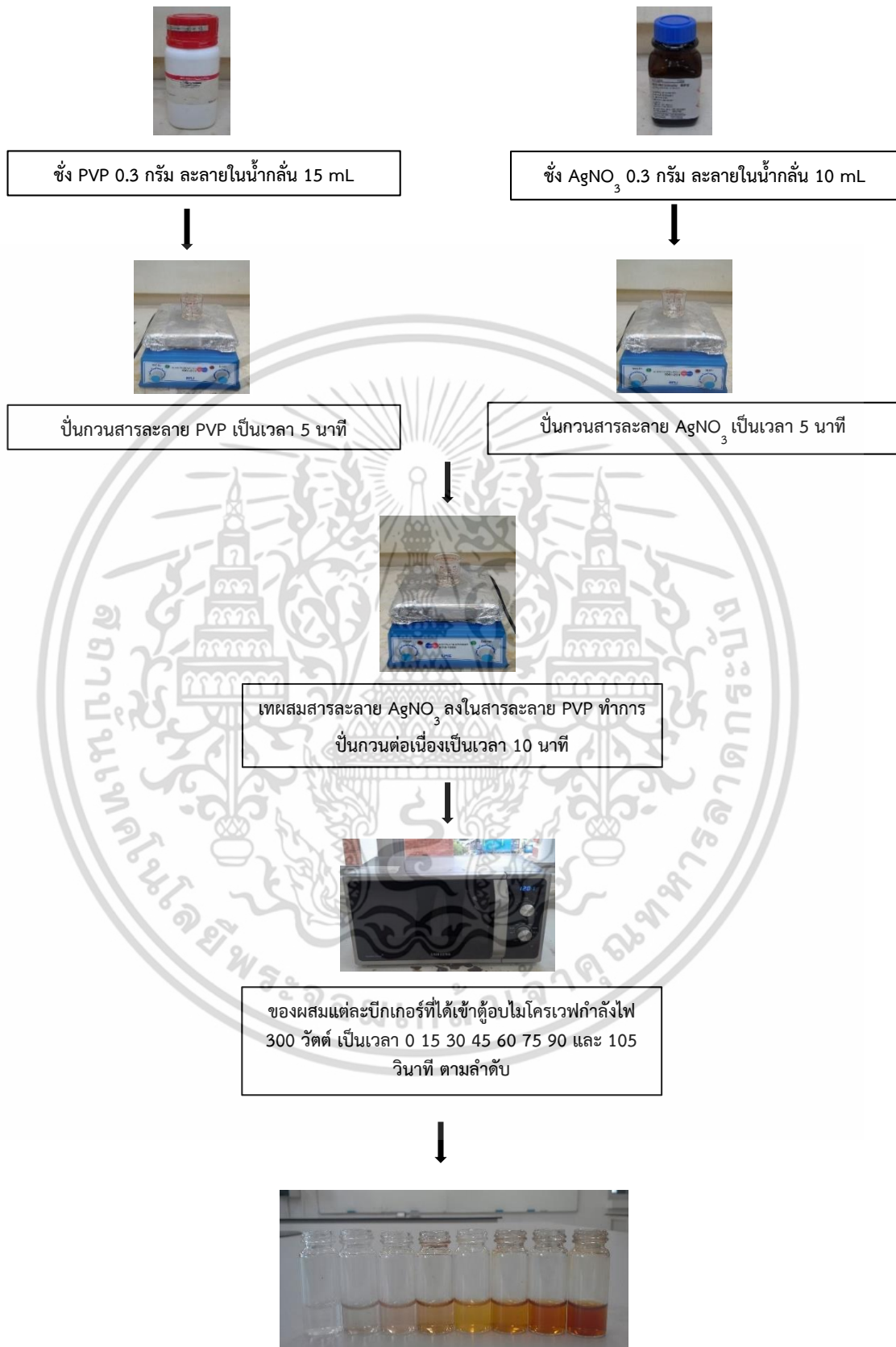
3.3.1.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้เทคนิคทางไมโครเวฟในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เป็นการศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพให้กับสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และใช้เทคนิคทางไมโครเวฟในการสังเคราะห์ ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ 0 15 30 45 60 75 90 และ 105 วินาที ตามลำดับ และจะนำสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจวัดช่วงของการดูดกลืนแสง โดยรายละเอียดขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังนี้

1. ชั่ง AgNO_3 จำนวน 0.3 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 mL แล้วเติมน้ำกลั่น 10 mL ปั่นกวนด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 5 นาที
2. ชั่ง PVP จำนวน 0.3 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ 50 mL แล้วเติมน้ำกลั่น 15 mL ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
3. เทสารทั้งสองบีกเกอร์ผสมกัน ปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที ได้สารละลายใสไม่มีสีปริมาตร 25 mL โดยเตรียมซ้ำจำนวน 8 บีกเกอร์ เพื่อใช้ในการศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟต่อไป
4. นำของผสมแต่ละบีกเกอร์ที่ได้เข้าตู้อบไมโครเวฟกำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 0 15 30 45 60 75 90 และ 105 วินาที ตามลำดับ ซึ่งในการสังเคราะห์แต่ละครั้งจะหยุดพักทุกๆ 15 วินาที เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อให้สารละลายไม่ร้อนจนเกินไป
5. นำสารที่ได้ทั้ง 8 ตัวอย่าง ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้น และช่วงดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อวิเคราะห์หาช่วงเวลาในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการวิจัยในขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เวลาในการใช้ไมโครเวฟแตกต่างกัน



สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากเวลาที่แตกต่างกันตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 ศึกษาผลของปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เป็นการศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนในปริมาณที่แตกต่างกันตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ AgNO_3 กับ PVP ที่ 1: 0.25 1: 0.50 1: 0.75 1: 1.00 และ 1: 1.25 โดยขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังนี้

1. เตรียมของผสมเหมือนวิธีข้างต้น ในปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน คือ 0.075 0.15 0.225 0.3 0.375 กรัม ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักแสดงดัง ตารางที่ 3.1
2. นำของผสมในแต่ละปิกเกอร์ไปเข้าตู้อบไมโครเวฟกำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลาตามที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น
3. นำสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้ไปตรวจวัดความเข้มข้นและช่วงดูดกลืนแสง

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนโดยน้ำหนักของ AgNO_3 กับ PVP ที่ใช้ในการศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ตามลำดับ

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดย น้ำหนัก (AgNO_3 : PVP)	AgNO_3 (กรัม)	PVP (กรัม)
Ag-PVP-0.25	1:0.25	0.300	0.075
Ag-PVP-0.50	1:0.50	0.300	0.150
Ag-PVP-0.75	1:0.75	0.300	0.225
Ag-PVP-1.00	1:1.00	0.300	0.300
Ag-PVP-1.25	1:1.25	0.300	0.375

3.3.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติโดยเติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน

3.3.2.1 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติโดยเติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ในปริมาณที่แตกต่างกัน

เป็นการศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่ผสมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ที่ปริมาณแตกต่างกันเพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธีการเตรียมแสดงดังนี้

1. ตวงสารละลายแอมโมเนีย (NH_4OH) ปริมาณ 1 2 และ 3 mL ผสมกับซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโน ปริมาณ 1 2 และ 3 mL ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.2 และปั่นกวนให้เข้ากัน
2. ตวงน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 6 mL ลงในปิกเกอร์ 50 mL
3. เทของผสมข้างต้นลงในน้ำยางธรรมชาติ แล้วปั่นกวนให้เข้ากัน
4. เทลงในแบบโดยใช้จานเพาะเชื้อ ทั้งของผสมไว้ข้ามคืนหลังจากนั้นแกะออกจากแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	น้ำยางธรรมชาติ (mL)	NH ₄ OH (mL)	AgNPs (mL)
NR/Ag-1.00	6.00	1.00	1.00
NR/Ag-2.00	6.00	2.00	2.00
NR/Ag-3.00	6.00	3.00	3.00

(หมายเหตุ ใช้เงื่อนไข Ag/PVP-1.00 ในการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติ)

3.3.2.2 ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน

เป็นการศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่ผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนในปริมาณที่แตกต่างกันตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ AgNO₃ กับ PVP ที่ 1: 0.25 1: 0.50 1: 0.75 1: 1.00 และ 1: 1.25 โดยขั้นตอนการเตรียมแสดงดังนี้

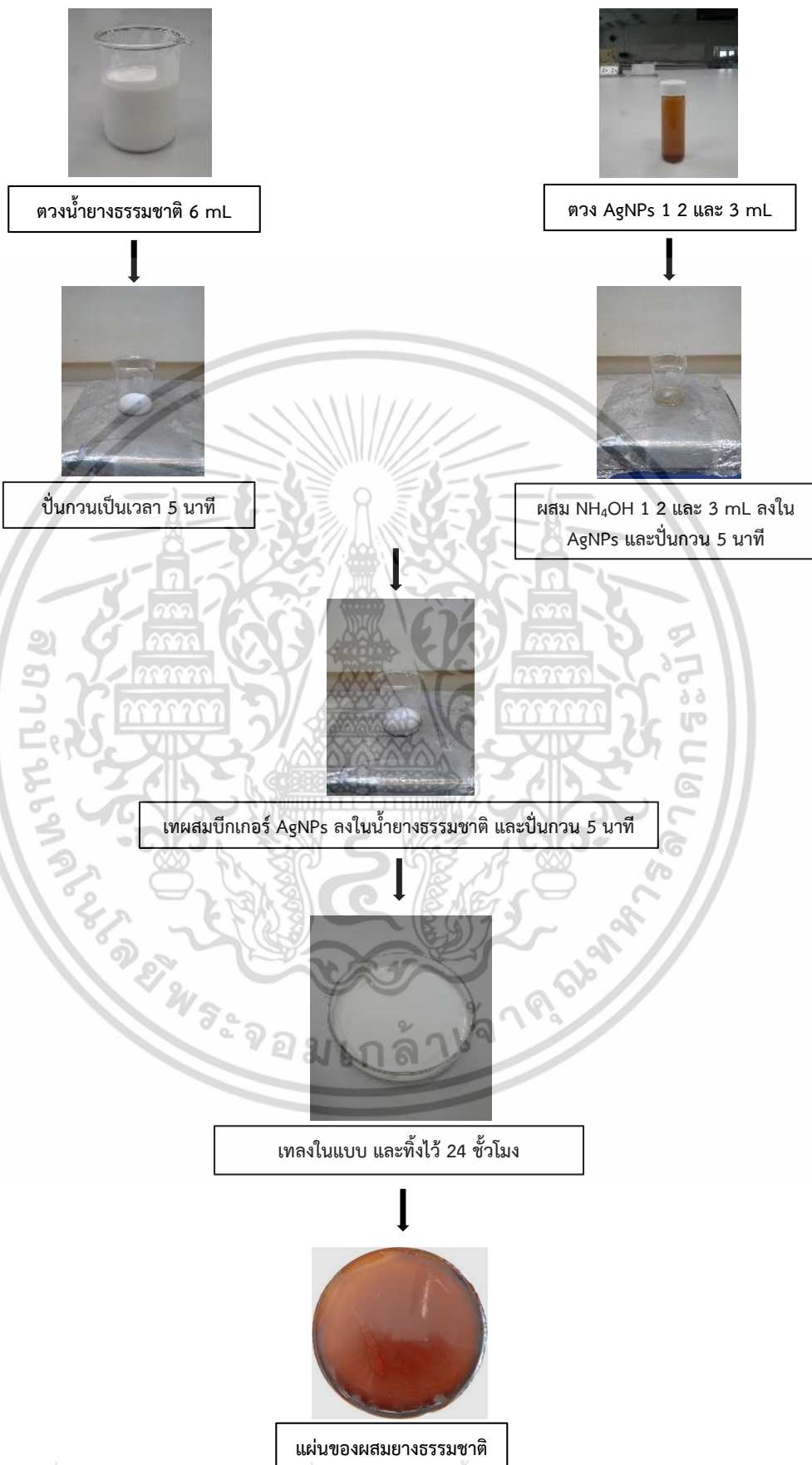
1. เตรียมแผ่นของผสมเหมือนวิธีข้างต้น โดยตวงสารละลายแอมโมเนีย (NH₄OH) ปริมาณ 2 mL ผสมกับสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ปริมาณ 2 mL ที่สังเคราะห์ได้ตามสัดส่วน 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 ตามลำดับ แล้วปั่นกวนให้เข้ากัน
2. ตวงน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 6 mL ลงในบีกเกอร์ 50 mL
3. เทของผสมข้างต้นลงในน้ำยางธรรมชาติ แล้วปั่นกวนให้เข้ากัน
4. เทของผสมลงในแบบโดยใช้จานเพาะเชื้อ ที่ไว้ข้ามคืนหลังจากนั้นแกะออกจากแบบ

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขในการเตรียมวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนสังเคราะห์ได้จากสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	น้ำยางธรรมชาติ (mL)	NH ₄ OH (mL)	AgNPs (mL)
NR/Ag-PVP-0.25	6.00	2	2 (Ag/PVP-0.25)
NR/Ag-PVP-0.50	6.00	2	2 (Ag/PVP-0.50)
NR/A-PVP-0.75	6.00	2	2 (Ag/PVP-0.75)
NR/Ag-PVP-1.00	6.00	2	2 (Ag/PVP-1.00)
NR/Ag-PVP-1.25	6.00	2	2 (Ag/PVP-1.25)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่แตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนและกราฟีนออกไซด์

3.3.3.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการตัดแปลงของสุมเมอร์

1. ชั่งกราฟไฟต์ 2 กรัม ผสมให้เข้ากันกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส 6 กรัม
2. เทสารผสมลงในขวดก้นกลมที่ภายนอกหล่อเย็นด้วยน้ำแข็ง ปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที
3. ค่อยๆเติมกรดซัลฟิวริกชนิดเข้มข้น 46 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที
4. นำขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง ปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำขวดก้นกลมมาหล่อเย็นต่อด้วยน้ำแข็ง จากนั้นค่อยๆเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
6. นำขวดก้นกลมออกจากถังน้ำแข็ง แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นหยุดให้ความร้อน
7. นำขวดก้นกลมมาหล่อเย็นต่อด้วยน้ำแข็ง แล้วเติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร จากนั้นนำออกจากถังน้ำแข็งแล้วปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที
8. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนต่อเป็นเวลา 20 นาที
9. นำสารที่ได้จากขวดก้นกลมมาหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที โดยหมุนเหวี่ยงทั้งหมด 2 รอบ
10. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 % ต่อปริมาตร มาล้างตะกอนแล้วหมุนเหวี่ยงต่อที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที โดยหมุนเหวี่ยงทั้งหมด 2 รอบ
11. นำสารที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน ล้างสารที่กรองด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับ pH ให้เป็นกลาง และล้างด้วยอะซิโตน 10 มิลลิลิตร
12. นำสารที่ได้จากการกรองไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง บดให้ละเอียดจะได้ผงสีน้ำตาลเข้มของกราฟไฟต์ออกไซด์
13. ชั่งกราฟไฟต์ออกไซด์ที่ได้ 0.4 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน
14. นำไปผ่านกระบวนการโซนิเคชัน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้สารแขวนลอยสีน้ำตาลเข้ม
15. นำสารแขวนลอยที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงต่อที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที รินสารข้างบนที่เป็นสารแขวนลอยของกราฟีนออกไซด์เก็บไว้ในขวดแก้ว ส่วนตะกอนที่เหลือสามารถนำไปผ่านกระบวนการโซนิเคชันได้ภายหลัง
16. หยดสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อที่บันทึกน้ำหนักไว้แล้ว 2 ใบ อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
17. นำจานเพาะเชื้อทั้ง 2 ใบ ออกจากเตาอบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่ง เปรียบเทียบกับน้ำหนักจานเพาะเชื้อตอนแรก เพื่อหาความเข้มข้นโดยเฉลี่ยของสารแขวนลอย กราฟีนออกไซด์ที่ได้ โดยมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์

เป็นการศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติเหมือนวิธีข้างต้นแต่ผสมสารกราฟีนออกไซด์ลงไป โดยสัดส่วนโดยน้ำหนักของสารกราฟีนออกไซด์และเงื่อนไขในการเตรียมวัสดุผสมจากยางธรรมชาติแสดง ดังตารางที่ 3.4 จากนั้นจะนำแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่อไป

ตารางที่ 3.4 แสดงเงื่อนไขในการเตรียมวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่เติมกราฟีนออกไซด์

ตัวอย่าง	Graphene Oxide (wt %)	น้ำยางธรรมชาติ (mL)	NH ₃ (mL)	AgNPs (mL)	GO (mL)
NR/Ag/GO-0.25	0.25	6.00	2.00	2.00	1.30
NR/Ag/GO-0.50	0.50	6.00	2.00	2.00	2.60
NR/Ag/GO-0.75	0.75	6.00	2.00	2.00	3.90

(หมายเหตุ ความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์มีค่าเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และเงื่อนไขที่ Ag/PVP-0.25)

3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ การทดสอบประสิทธิภาพทางเชิงกล ทางความร้อน และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

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) โดยตัวอย่างอนุภาคซิลเวอร์นาโน กราฟีนออกไซด์ และที่นำไปวิเคราะห์ จะทำการเจือจางให้มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 0.5-1.0 แล้วบรรจุลงใน Cuvette และนำเข้าเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยวัดในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร เพื่อศึกษาสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์

3.4.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือเทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างโดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) เทคนิค XRD อาศัยหลักการของเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งวนวนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะขึ้นกับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ในการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ จึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างผลึกของกราฟีนออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผง รวมถึงแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติ ซึ่งตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงเตรียมได้โดยการบดผงของสารตัวอย่างให้ละเอียดพอประมาณ จากนั้นนำไปอัดลงบนแผ่นกระจกที่มีลักษณะเป็นหลุมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตรมีความลึกประมาณ 3 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)

3.4.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (Attenuated Reflection Fourier-Transform Infrared; ATR-FTIR)

เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ ตรวจสอบโครงสร้างของสารโดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วง Infrared (IR) ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารได้ จึงนำเทคนิคดังกล่าวนี้มาใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนไปของกราฟีนออกไซด์ และแผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยถ้าหากตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นผง จะทำการเตรียมตัวอย่างแบบ KBr-disc โดยวิธีการคือ บดสารตัวอย่างปริมาณ 1-2 มิลลิกรัม รวมกับผง KBr ปริมาณ 100 มิลลิกรัม อบให้แห้งแล้วบดรวมกัน จากนั้นทำการอัดเป็นแผ่นจนได้ตัวอย่างที่มีลักษณะกลมแบนใสคล้ายแก้ว (KBr Disc) แล้วนำตัวอย่างวางบนลำรังสี IR แต่ถ้าตัวอย่างเป็นแผ่นจะสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างได้ทันที

3.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM)

ใช้ศึกษาขนาดอนุภาคและโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์ ที่เล็กระดับนาโนเมตร ทำให้การศึกษขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบปกติไม่สามารถตรวจสอบได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน โดยการหยดตัวอย่างลงบน Cu-grid ที่ไว้จนแห้ง ซึ่งสามารถตรวจสอบอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนได้ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการส่องผ่านตัวอย่าง และ TEM สามารถศึกษาตัวอย่างที่มีขนาดเล็กที่มีขนาดตั้งแต่ 0.2 นาโนเมตร ถึง 0.2 มิลลิเมตรได้

3.4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

ใช้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของพื้นผิวและภาพตัดขวางของแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติ เนื่องจากตัวอย่างมีลักษณะเป็นแผ่นยาง อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงต้องทำการเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำ นำสารตัวอย่างไปติดบน Stub เพื่อให้การฉาบผิวทำได้ทั่วถึง จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการเคลือบทอง แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3000 6000 และ 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ ธาตุคาร์บอนถึงธาตุยูเรเนียม ทดสอบได้ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือเป็นผง วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ หลักการของเทคนิคนี้คือ ให้รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนสารตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์จะทำให้อิเล็กตรอนในวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออกไป อิเล็กตรอนในวงถัดมาจะเข้ามาแทนที่และคายพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุนั้น เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และความเข้มข้นของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ซึ่งจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติ

3.4.7 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์วัตถุตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์หาชนิด (Qualitative Analysis) ของตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เช่น อัญมณี แร่ และวัสดุต่างๆ โดยส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งไม่สามารถแสดงสเปกตรัมในช่วงอินฟราเรด โดยหลักการของรามานสเปกโตรมิเตอร์จะตรวจสอบโดยการวัดเปรียบเทียบการกระเจิงแสงแบบรามานของวัสดุหรือสารเคมีใช้ในการตรวจสอบ ใช้หาความยาวพันธะในโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว ซึ่งจะทำให้สามารถระบุหาประเภทของสารตัวอย่างได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนั้นจึงใช้วัสดุสารได้ทุกประเภททั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จึงนำเทคนิคดังกล่าวนี้มาใช้ในการศึกษาชนิดของสารประกอบที่อยู่ในรูปกราฟีนออกไซด์

3.4.8 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

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

- ขนาดชิ้นงาน 10 x 50 x 0.60 ตารางมิลลิเมตร
- ความเร็วในการดึง 250 มิลลิเมตรต่อนาที
- ความยาวเกจ (Gauge length) 20 มิลลิเมตร
- ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ 100 นิวตัน
- จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ 6 ชิ้นต่อชิ้นงาน

โดยการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) รวมถึงค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ค่าการคงรูป (Stiffness) ค่าความเค้นสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) จึงนำมาใช้ในการศึกษาหาค่าความแข็งแรงเชิงกลของยางธรรมชาติกับแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติ

3.4.9 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูงในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมได้ สามารถใช้ในการศึกษาสมบัติของตัวอย่างได้หลากหลายชนิด ทั้งตัวอย่างในกลุ่มเซรามิก พอลิเมอร์หรือสารอนินทรีย์ต่างๆ สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนักรวม ไปจนถึงการหาสารเจือปนในตัวอย่างได้ จึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติโดยเตรียมแผ่นยางผสมที่เตรียมได้ให้มีน้ำหนักประมาณ 8-12 มิลลิกรัม บรรจุลงในจาน (Pan) ที่แขวนอยู่บน Micro balance แล้วทำการทดสอบโดยการตั้งโปรแกรมทดสอบให้ความร้อนต่อชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40 °C จนถึงอุณหภูมิ 800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

3.4.10 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-Bacterial test)

ทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติด้วยวิธี Agar disc diffusion จะวิเคราะห์ผลการทดลองจากการเกิดโซนยับยั้ง (Inhibition Zone) บนจานเลี้ยงเชื้อโดยจะทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดได้แก่ *Staphylococcus aureus* (แกรมบวก) และ *Escherichia coli* (แกรมลบ) โดยเชื้อแบคทีเรียมีความเข้มข้น = 1×10^8 cfu/mL และทำการบ่ม (Incubated) ที่อุณหภูมิ 37 °C

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการพัฒนาสมบัติของวัสดุผสมจากยางธรรมชาติโดยเตรียมให้อยู่ในลักษณะแผ่นของผสมยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และศึกษาสมบัติทางเชิงกลและสมบัติทางความร้อน โดยหัวข้อของผลการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ

1. การศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และการพิสูจน์เอกลักษณ์
2. การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติ และการพิสูจน์เอกลักษณ์
3. การศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ
4. การศึกษาสมบัติทางเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ

โดยรายละเอียดผลการวิจัยในแต่ละหัวข้อแสดงได้ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และการพิสูจน์เอกลักษณ์

4.1.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ไมโครเวฟในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เป็นการศึกษาการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพให้กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และใช้เทคนิคทางไมโครเวฟในการสังเคราะห์ โดยในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ 0 15 30 45 60 75 90 และ 105 วินาที ตามลำดับ และใช้เทคนิค UV- visible spectroscopy ในการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อยืนยันการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์

4.1.1.1 ลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคทางไมโครเวฟในเวลาที่แตกต่างกัน



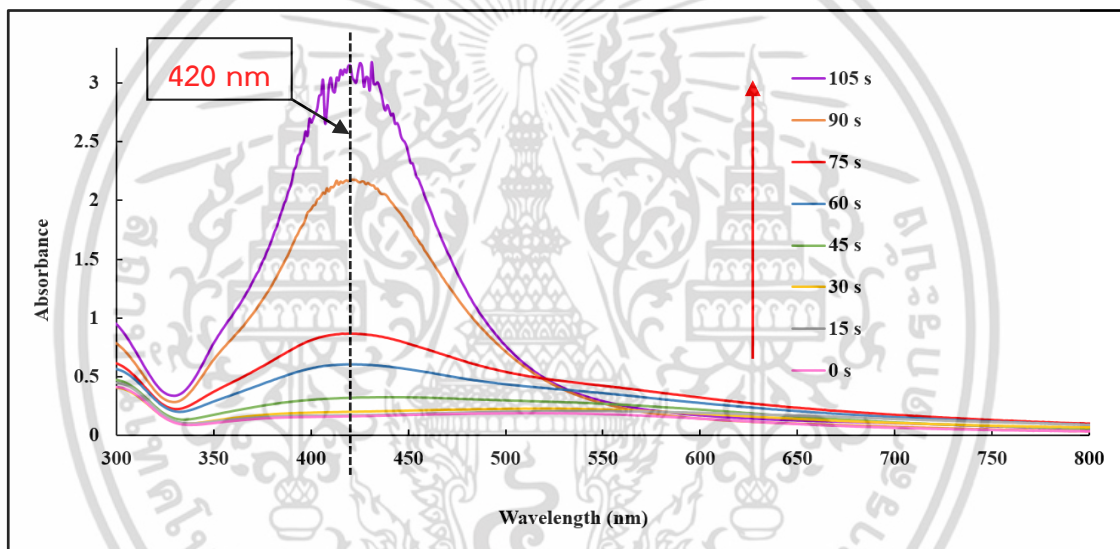
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในเวลาที่แตกต่างกัน

จาก 0 – 105 วินาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในเวลาที่แตกต่างกัน โดยทุกช่วงเวลาจะสามารถสังเกตเห็นสีของสารที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเริ่มต้นจากใสไม่มีสีที่เวลา 0 วินาที จนเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลส้มที่เวลา 105 วินาทีตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์จะค่อยๆมีการเกิดผลึกของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในลักษณะสารแขวนลอยเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ Ag^+ ที่อยู่ในระบบจะเปลี่ยนเป็น Ag^0 มากขึ้น และจะมีสีเข้มมากที่สุดที่ระยะเวลา 105 วินาที โดยลักษณะสีของสารที่เกิดขึ้นตั้งแต่ช่วง 45 วินาที แสดงถึงลักษณะการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนในลักษณะของสารแขวนลอย [49] และจะมีความเข้มข้นมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์จนถึง 105 วินาที และการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนในลักษณะสารแขวนลอยสามารถยืนยันได้จากการเทคนิค UV- visible spectroscopy ดังรูปที่ 4.2

4.1.1.2 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV- visible spectroscopy ของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เวลาในการสังเคราะห์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 แสดงช่วงของการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในเวลาที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.2 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในเวลาที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิค UV- visible spectroscopy พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์จะเกิดพีคของช่วงการดูดกลืนแสง เริ่มสังเกตได้ที่เวลา 45 วินาที และมีช่วงการดูดกลืนแสงอยู่ที่ประมาณ 420 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงพีคเอกลักษณ์ของการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนในลักษณะสารแขวนลอย [49] เนื่องจากสมบัติเชิงแสง หรือ เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (SPR) ของสารอนุภาคนาโน และเมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์จนถึง 105 วินาที จะสังเกตเห็นค่าความเข้มข้น (Absorbance) ที่มากขึ้น หรือกล่าวคือมีจำนวนอนุภาคของซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และช่วงของการดูดกลืนแสงยังคงมีค่าคงเดิม ดังนั้นจากผลข้างต้นแสดงถึงสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพ ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ และจะมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การศึกษาผลของปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนในการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เป็นการศึกษาการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพให้กับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน และใช้เทคนิคทางไมโครเวฟในการสังเคราะห์ ซึ่งปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้แตกต่างกันจะคิดเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารซิลเวอร์ในเตรทกับสารพอลิไวนิลไพโรลิโดน ในอัตราส่วน 1:0.25 1:0.5 1:0.75 1:1 และ 1:1.25 กล่าวคือเป็นการศึกษาผลของปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดน โดยใช้สารซิลเวอร์ในเตรทในปริมาณที่คงที่ และใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่ 90 วินาที ซึ่งในส่วนนี้จะใช้เทคนิค UV- visible spectroscopy กับภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน หรือ TEM มาใช้ในการยืนยันการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโน

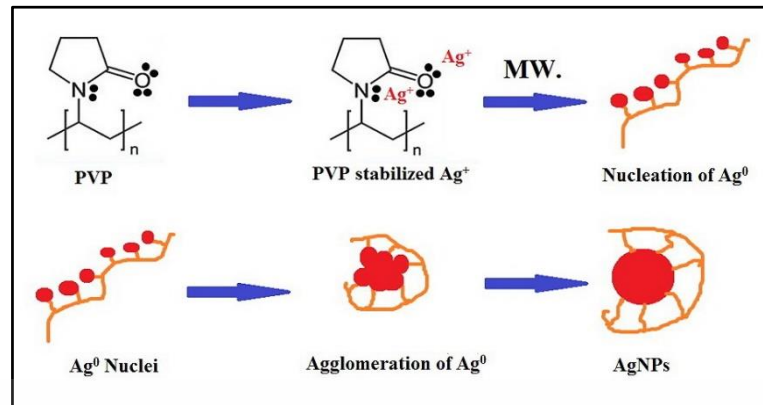
4.1.2.1 ลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกันจากซ้ายไปขวา

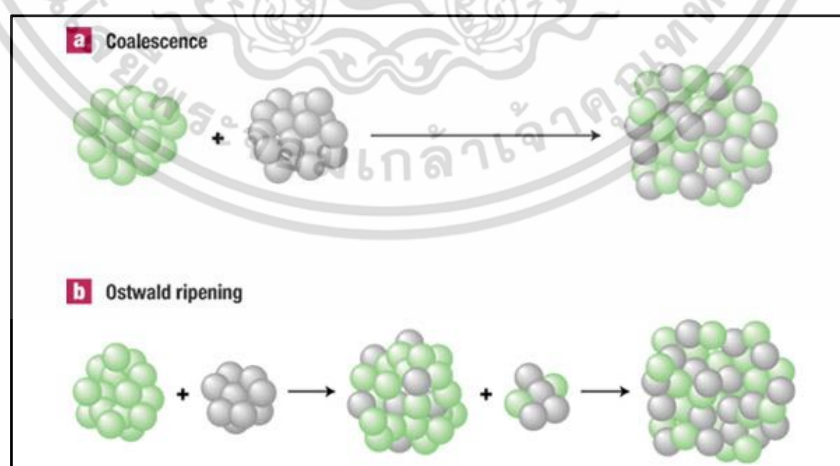
จากรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน คือ 1:0.25 1:0.5 1:0.75 1:1 และ 1:1.25 ตามลำดับ และใช้เวลาในการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟที่เวลา 90 วินาที จะพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนในการสังเคราะห์จะทำให้สังเกตเห็นสีของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีสีส้มเหลืองเข้มมากขึ้น หรือมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดน ซึ่งเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้ซิลเวอร์ไอออนสามารถเข้าไปเกาะกับสายโซ่พอลิเมอร์และถูกรีดิวซ์ได้มาก จึงทำให้มีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดบนสายโซ่พอลิเมอร์ได้มากขึ้น ซึ่งกลไกที่เป็นไปได้สำหรับการการเกิดผลึกอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนสายโซ่พอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงกลไกที่เป็นไปได้ของการเกิดผลึกอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารพอลิไวนิลไพร์โรลิโดนเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มเสถียรภาพ

จากรูปที่ 4.4 แสดงกลไกที่เป็นไปได้ของการเกิดผลึกอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยเริ่มจากซิลเวอร์ไอออนที่ได้จากการละลายซิลเวอร์ไนเตรตรับอิเล็กตรอนคู่จากไนโตรเจนและออกซิเจนที่อยู่ภายในโมเลกุลของพอลิไวนิลไพร์โรลิโดน หรือกล่าวคือซิลเวอร์ไนเตรตเกิดพันธะโคออดิเนต (Coordinate covalent) กับไนโตรเจนและออกซิเจนของพอลิไวนิลไพร์โรลิโดน ทำให้เปลี่ยนเป็น Ag^0 [4] จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางไมโครเวฟ ซึ่งจะเป็นเทคนิคที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการก่อตัวของผลึกอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้เร็วขึ้น แต่เนื่องจากสายโซ่ของสารพอลิเมอร์มีความซับซ้อนอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้ผลึกของอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถเกิดการรวมตัวกันในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งปรากฏการณ์ที่ทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันสามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ ปรากฏการณ์ Coalescence และ ปรากฏการณ์ Ostwald ripening [50] ดังรูปที่ 4.5 และเมื่อขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นคงที่สารพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพร์โรลิโดนนี้จะล้อมรอบอนุภาคและช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่มากขึ้น [4]

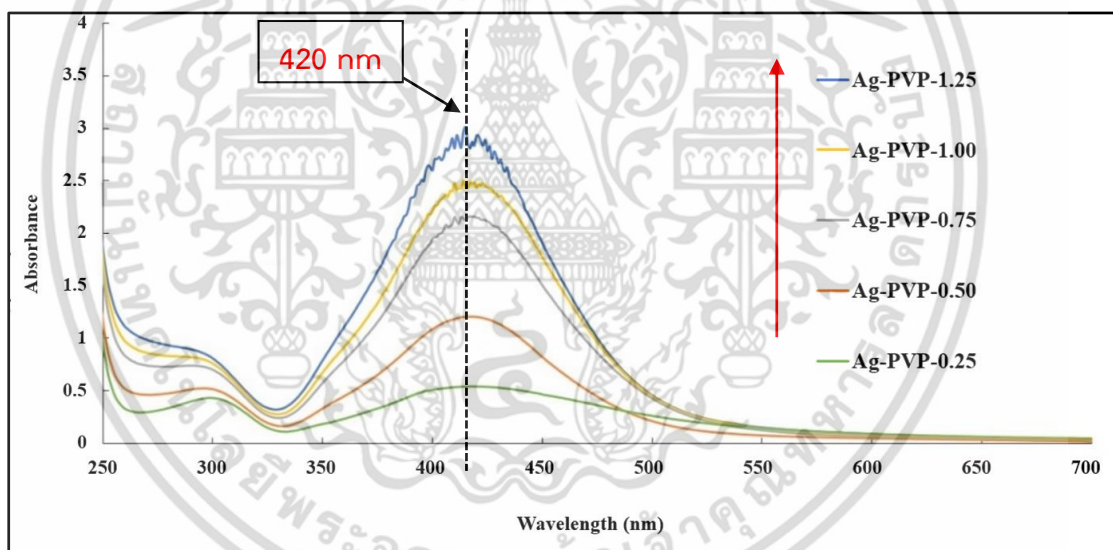


รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การรวมตัวกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เรียกว่าปรากฏการณ์ Coalescence และ ปรากฏการณ์ Ostwald ripening [53]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การรวมตัวกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ คือ ปรากฏการณ์ Coalescence หมายถึง การที่ก้อนอนุภาคที่มีขนาดเท่ากันๆเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น และปรากฏการณ์ Ostwald ripening จะหมายถึง การที่ก้อนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ามารวมตัวเข้ากับก้อนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าทำให้เกิดเป็นก้อนอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งในส่วนของ การเกิดผลึกของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้นั้นสามารถมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้นได้ทั้งสองแบบ โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดอนุภาคของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกิดขึ้น กล่าวคือ ถ้าสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดหลากหลายก็จะมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้นแบบปรากฏการณ์ Ostwald ripening แต่ถ้าขนาดอนุภาคของสารซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดใกล้เคียงกันก็จะมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้นแบบปรากฏการณ์ Coalescence เกิดขึ้น [50] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงได้จากผลของเทคนิค UV-vis spectroscopy และเทคนิค TEM ต่อไป

4.1.2.2 กราฟค่าดูดกลืนแสงของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน



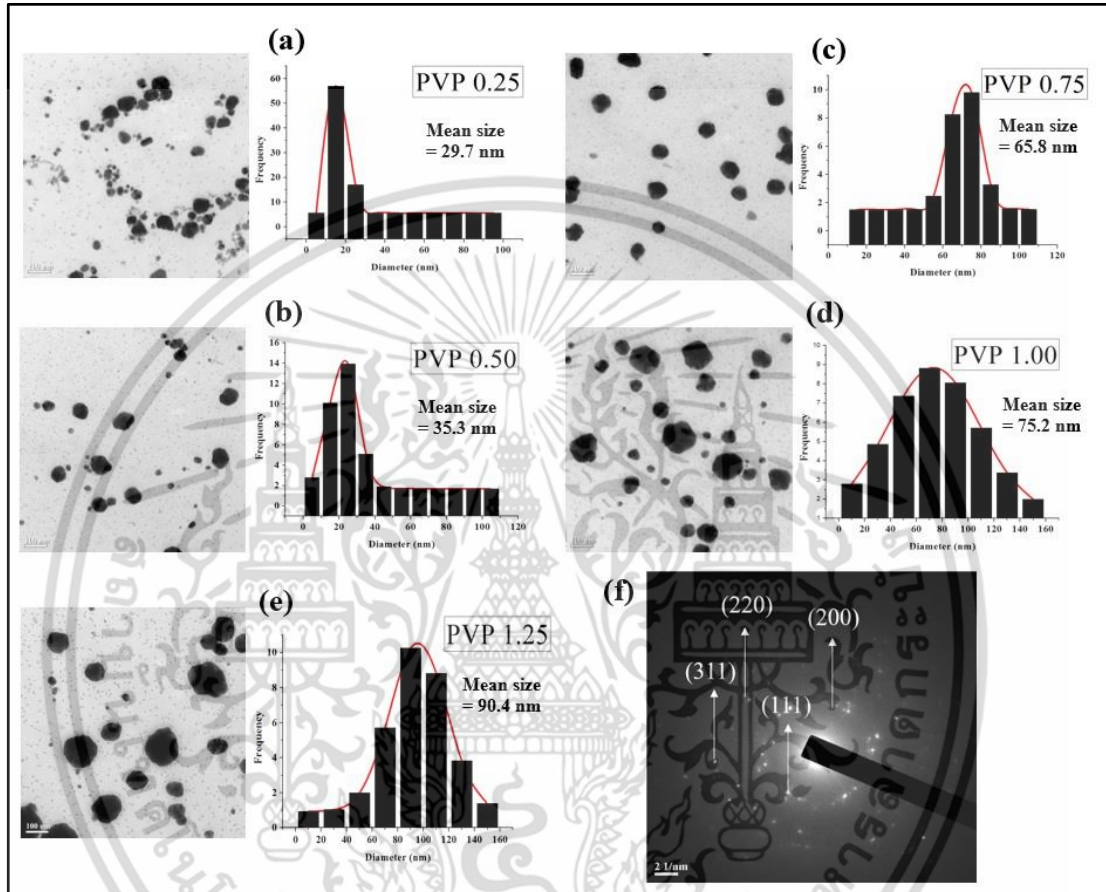
รูปที่ 4.6 แสดงช่วงของการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่าง

จากรูปที่ 4.6 แสดงช่วงของการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ในปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่าง จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้ในการสังเคราะห์มากขึ้น จะทำให้มีความเข้มข้นของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากซิลเวอร์ไอออนสามารถเข้าไปเกิดพันธะโคออดิเนตได้มาก และจะสังเกตได้ว่าช่วงของการดูดกลืนแสงจะมีค่าไปทางความยาวคลื่นที่มีค่ามากเมื่อเพิ่มปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนในเงื่อนไข Ag-PVP-1.00 เท่ากับ 423 nm และ Ag-PVP-1.25 เท่ากับ 426 nm ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงมีการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นตามปรากฏการณ์ SPR [51]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และเทคนิค SAED

เทคนิค TEM หรือ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะอนุภาคของซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากวิธีข้างต้น ซึ่งเทคนิคนี้สามารถแสดงให้เห็นลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคในระดับนาโนของสารที่สังเคราะห์ได้ ส่วนภาพถ่าย SAED แสดงลักษณะวงแหวนที่ใช้ในการยืนยันลักษณะโครงสร้างผลึกของสารซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้

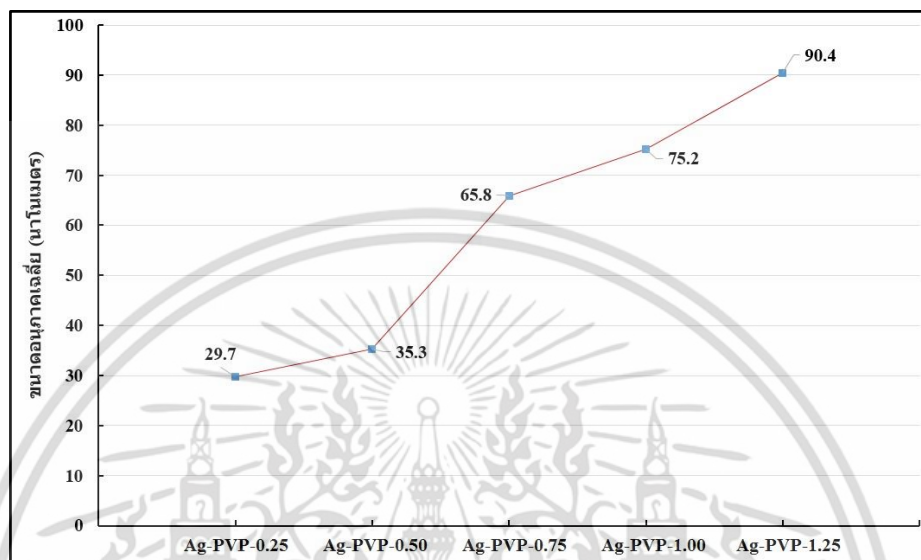


รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน (a) – (e), แสดงผลึกของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากเทคนิค SAED (f)

จากรูปที่ 4.7 (a) – (e) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ซึ่งแสดงลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกิดขึ้นในลักษณะคล้ายทรงกลม (Sphericals-like) โดยจากค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้ในการสังเคราะห์จะทำให้เกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 29.7 ถึง 90.4 นาโนเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากปรากฏการณ์การรวมตัวกันของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยที่อนุภาคในช่วงเริ่มต้นจะมีขนาดใกล้เคียงกัน จึงสามารถเกิดการรวมตัวกันแบบ Coalescence และเมื่อขนาดอนุภาคมีความหลากหลายมากขึ้นก็จะสามารถเกิดการรวมตัวกันแบบปรากฏการณ์ Ostwald ripening โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกิดซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้ในการสังเคราะห์ และภาพ (f) แสดงโครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนจากเทคนิค SAED พบว่าสามารถพบเฟส (220) (200) (311) และ (111) ซึ่งเป็นการยืนยันการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนผลึกลักษณะ face-centred-cubic หรือ (fcc) อ้างอิงจาก (JCPDS, File No.04-0783) [52] ดังนั้น แสดงให้เห็นว่าสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีข้างต้น



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารซิลเวอร์อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน

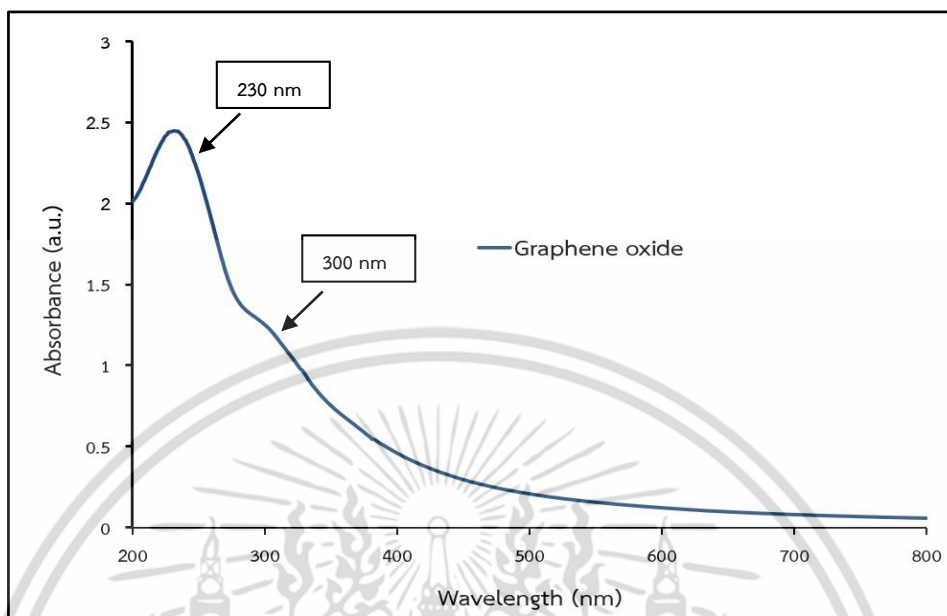
4.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ และการพิสูจน์เอกลักษณ์

4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ

แผ่นของผสมยางธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ แผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการขึ้นรูปอย่างง่าย โดยทำการผสมโดยตรงระหว่างสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์กับน้ำยางธรรมชาติ จากนั้นทำการเทขึ้นรูปแล้วทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แกะออกจากแบบ และนำแผ่นของผสมที่เตรียมได้รวมถึงกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การวัดค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค UV-visible spectroscopy, ตรวจสอบโครงสร้าง และหมู่ฟังก์ชันของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ และกราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR, ตรวจสอบช่วงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ และกราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD, ตรวจสอบโครงสร้างของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ และกราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy, ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวของแผ่นของผสมยางธรรมชาติด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของแผ่นของผสมยางธรรมชาติด้วยเทคนิค EDX ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของกราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)



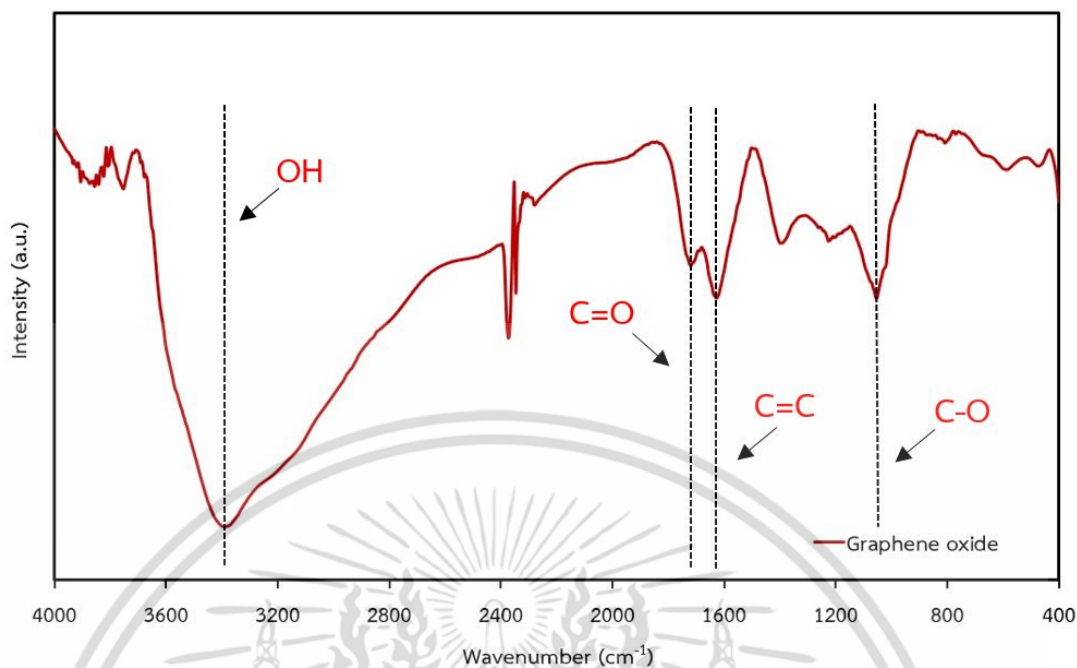
รูปที่ 4.9 แสดงค่าการดูดกลืนแสงจากเทคนิค UV-vis ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

กราฟีนออกไซด์มีลักษณะการดูดกลืนแสงอยู่ 2 ช่วง ช่วงแรกที่เราเห็นได้ชัดมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 230 นาโนเมตร เป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากชั้น π ไปสู่ชั้น π^* ซึ่งเป็นค่าเอกลักษณ์ของพันธะ C-C ของวงอะโรมาติกที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของกราฟีนออกไซด์ ในส่วนที่ช่วงที่ 2 ที่พบบริเวณไหล่ของกราฟีนมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 300 นาโนเมตร มาจากการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากชั้น n ไปสู่ชั้น π^* ซึ่งเป็นค่าเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชัน อย่าง หมู่คาร์บอนิล ($-C=O$) หมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) หรือหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ที่คงเหลืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (e^- lone-pair) ที่ยังไม่ได้ใช้ทำพันธะ จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปมา (e^- delocalized) ได้สะดวกมากยิ่งขึ้น การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนแบบ $n - \pi^*$ จึงใช้พลังงานน้อยกว่าการเปลี่ยนสถานะแบบ $\pi - \pi^*$ [56]

4.2.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ของกราฟีนออกไซด์

เป็นการศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆของกราฟีนออกไซด์ โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ หรือเทคนิค ATR-FTIR โดยแต่ละพันธะของสารกราฟีนออกไซด์ จะเกิดการสั่นในลักษณะที่ต่างกันเมื่อได้รับคลื่นอินฟราเรด (Infrared radiation) ซึ่งจะให้ค่าเลขคลื่นที่เป็นเอกลักษณ์ของแต่ละพันธะ โดยกราฟีนออกไซด์จัดเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันและลักษณะพันธะที่เป็นเอกลักษณ์ประกอบอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งจะแตกต่างจากกราฟีน และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน หรือ มีหมู่ฟังก์ชันอยู่น้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิคเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในการพิสูจน์เอกลักษณ์สารกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยจะได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

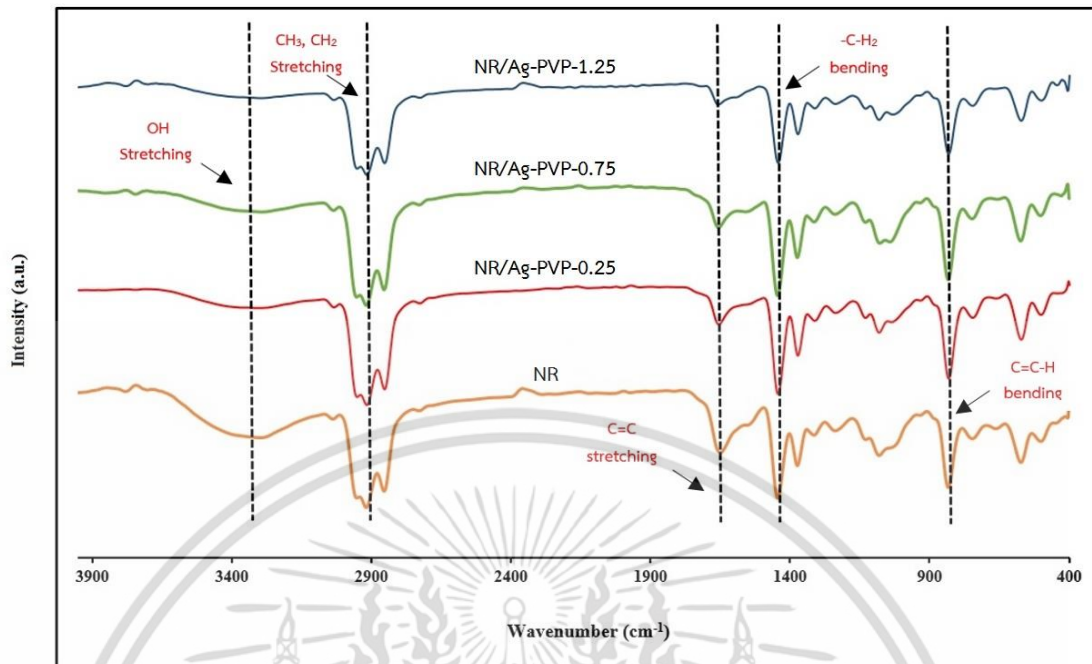


รูปที่ 4.10 แสดง FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันต่างๆของกราฟีนออกไซด์

การดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันให้แก่กราฟไฟต์เพื่อให้กราฟีนออกไซด์นั้น เป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันต่างๆ อย่าง หมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิล หมูคีโตน หมูอีพอกซี หรือหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งสอดคล้องกับผลจากเทคนิค FT-IR ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.10 สเปกตรัมสีแดงของกราฟีนออกไซด์ ปรากฏพีดสำคัญที่เห็นได้ชัดคือ ช่วงเลขคลื่นบริเวณ 3200 ถึง 3600 cm^{-1} ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะในการสั่นของพันธะ O-H ที่มาจากหมู่คาร์บอกซิลหรือหมู่ไฮดรอกซิล ถัดมาที่เลขคลื่นบริเวณ 1700 cm^{-1} และ 1640 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ C=O และ C=C ตามลำดับ พบว่าพีดของ C=C นั้นมีความเข้มที่สูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของกราฟีนออกไซด์นั้นเป็นวงอะโรมาติก จึงมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนต่อคาร์บอนมากกว่าคาร์บอนต่อออกซิเจนที่มาจากหมู่คาร์บอนิล ที่เป็นเพียงส่วนหนึ่งของหมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนแผ่นกราฟีนออกไซด์ และพบช่วงเลขคลื่นบริเวณ 1080 cm^{-1} จากการสั่นของพันธะ C-O ที่มาจากการสั่นของหมู่อีพอกซีหรือแอลคอกซี (alcoxy; R-O-R) [56]

4.2.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน

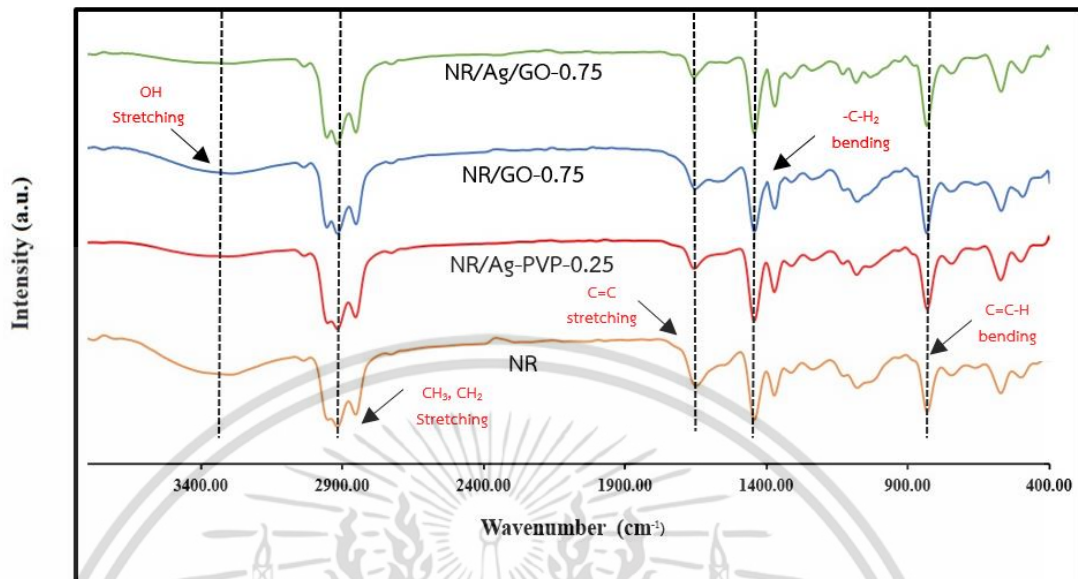
เทคนิค Attenuated Reflection Fourier-Transform Infrared หรือ ATR-FTIR เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบที่อยู่ในวัสดุ ซึ่งแต่ละโมเลกุลจะมีลักษณะของการสั่นเมื่อได้รับคลื่นอินฟราเรดในลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำผลจากเทคนิค ATR-FTIR มาช่วยในการยืนยันหมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบของแผ่นของผสมที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นของผสมในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.75 และ NR/Ag-PVP-1.25 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.11 กราฟของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) จะพบแถบการสั่นที่เป็นพิคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติ คือ แถบการสั่นแบบยืดของ CH_3 (CH_3 stretching) ที่เลขคลื่น 2960 cm^{-1} แถบการสั่นที่เลขคลื่น 2917 cm^{-1} และ 2853 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบยืดแบบไม่สมมาตร (asymmetry stretching) และสมมาตร (symmetry stretching) ของ CH_2 ตามลำดับ พบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1650 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ($\text{C}=\text{C}$ stretching) พบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1440 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบงอของ CH_2 ($-\text{C}-\text{H}_2$ bending) และพบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 830 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบงอของ $\text{C}=\text{C}-\text{H}$ ($\text{C}=\text{C}-\text{H}$ bending) [58] ซึ่งในส่วนของวัสดุผสมจากยางธรรมชาติจะพบพิคที่เป็นพิคเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีการเติมปริมาณของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปแผ่นยางธรรมชาติในอัตราส่วนที่น้อยมากๆ เมื่อเทียบกับปริมาณของน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น ซึ่งส่งผลให้แถบการสั่นของยางธรรมชาติยังคงแถบการสั่นของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ แต่ค่าความเข้มที่ตรวจวัด (Intensity) ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติพบว่าจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้ในการสังเคราะห์ เนื่องจากจะทำให้ได้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นมาก จึงทำให้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อของแผ่นยางธรรมชาติไปบดบังแถบการสั่นที่เป็นพิคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติจึงทำให้เห็นค่าความเข้มที่ตรวจวัด ลดลงตามลำดับ

4.2.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของแผ่นของผสม NR/AgNPs/GO ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

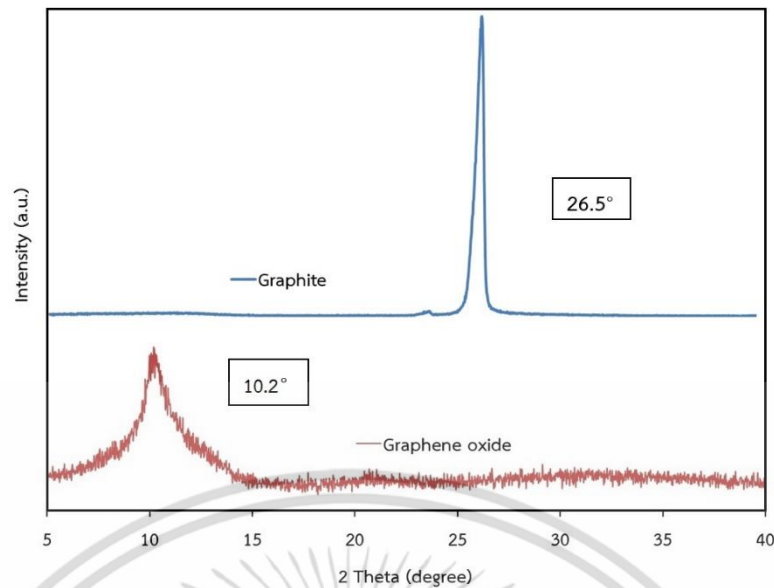


รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ FT-IR ของ NR, NR/Ag-PVP-0.25, NR/GO-0.75 และ NR/Ag/GO-0.75

จากรูปที่ 4.12 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นยางธรรมชาติ (NR) วัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ตามเงื่อนไข PVP-0.25 (Ag) แผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ (GO) และแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (AgGO) พบว่ากราฟ NR จะสังเกตเห็นพิกเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติที่ 2960 cm^{-1} , 2920 cm^{-1} , 1447 cm^{-1} , 1086 cm^{-1} และ 838 cm^{-1} เนื่องจากโครงสร้าง cis-isoprene ในแผ่นยางธรรมชาติ [58] และในส่วนของกราฟ Ag, GO และ AgGO ก็จะมีพิกเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติเช่นเดียวกับกราฟ NR เนื่องจากทั้งปริมาณของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และสารกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป ปริมาณที่น้อยมากๆเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ จึงทำให้ไม่สามารถเห็นพิกเอกลักษณ์ของทั้งสารซิลเวอร์นาโน และสารกราฟีนออกไซด์ได้ แต่จากค่าความเข้มที่ตรวจวัด สามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อเติมทั้งสารซิลเวอร์นาโน และสารกราฟีนออกไซด์ ลงไปในแผ่นยางธรรมชาติจะทำให้ความเข้มของพิกเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติมีค่าลดลง เนื่องจากสารซิลเวอร์นาโน และสารกราฟีนออกไซด์ไปบดบังการสั่นของโมเลกุลของแผ่นยางธรรมชาติ

4.2.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ของกราฟีนออกไซด์

การใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเป็นการช่วยยืนยันกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ ว่ามีลักษณะของโครงสร้างและอัญฐานอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับและกราฟไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นก่อนผ่านกระบวนการของซุ้เมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันระหว่างกราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ที่

กราฟไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นนั้นมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ มีความเป็นผลึกสูง ทำให้ได้พีก (peak) ที่แคบและมีความเข้ม (intensity) ที่สูง ซึ่งมีองศาเลี้ยวเบน (2θ) อยู่ที่ 26.5° (degree) เมื่อคำนวณผ่านสมการที่ (1) ซึ่งเป็นสมการในการคำนวณตามกฎของแบร็กส์ (Bragg's Law) จะได้ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (d-spacing) อยู่ที่ 0.336 นาโนเมตร หลังจากนั้นเมื่อนำกราฟไฟต์มาดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันด้วยกระบวนการของฮูเมอร์ แล้วผ่านกระบวนการโซนิเคชันเพื่อให้ได้กราฟีนออกไซด์ ทำให้ความกว้างระหว่างระนาบของผลึกนั้นมากยิ่งขึ้นด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆ อย่าง หมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิล หรือหมู่ไฮดรอกซิล ความเป็นผลึกและความเป็นระเบียบจึงลดลง ส่งผลให้พีกของกราฟีนออกไซด์มีความกว้างมากยิ่งขึ้น โดยแสดงองศาเลี้ยวเบนอยู่ที่ 11.8° และมีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกอยู่ที่ 0.749 นาโนเมตร สุดท้ายเมื่อผ่านกระบวนการรีดักชันแล้วได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่าพีกกลับไปมีองศาเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับกราฟไฟต์ อันเนื่องมาจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ก็คือ คาร์บอนระนาบชั้นเดียวของกราฟไฟต์ แต่เนื่องจากความเป็นผลึกและความเป็นระเบียบลดลงจากการถูกรีดิวซ์ ทำให้ได้พีกที่มีความกว้างมากขึ้น ซึ่งมีองศาเลี้ยวเบนอยู่ที่ 24.2° และมีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกอยู่ที่ 0.364 นาโนเมตร [57]

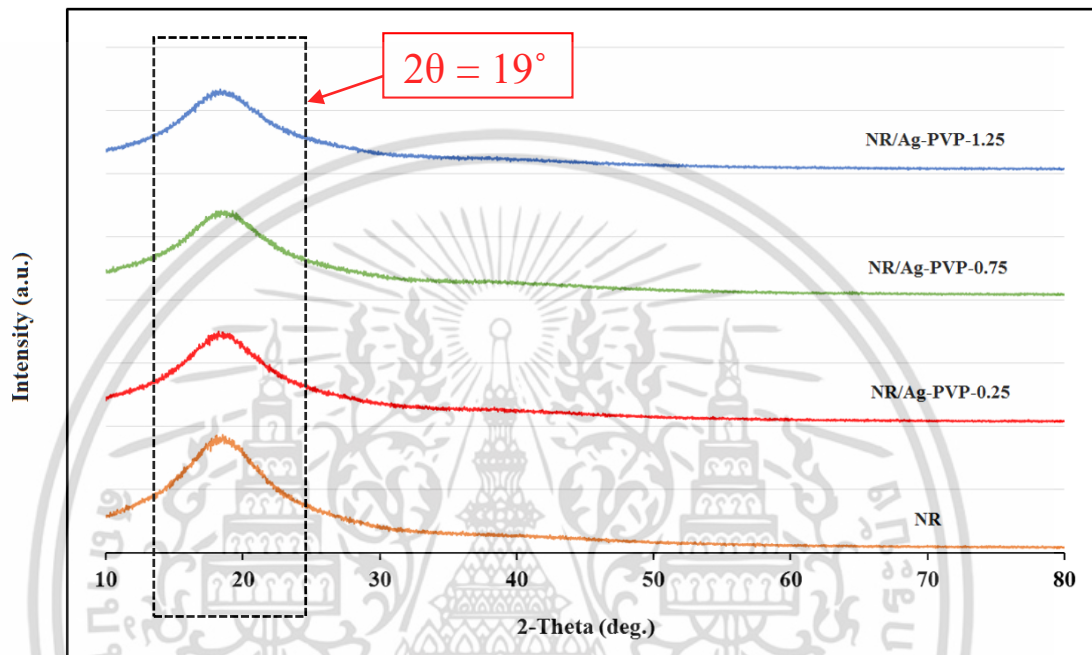
$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนเต็มของลำดับการสะท้อน
	λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้ หน่วยเป็น นาโนเมตร (nm)
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก หน่วยเป็น นาโนเมตร (nm)
	θ	คือ	องศาเลี้ยวเบน หน่วยเป็น ดีกรี (degree)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน

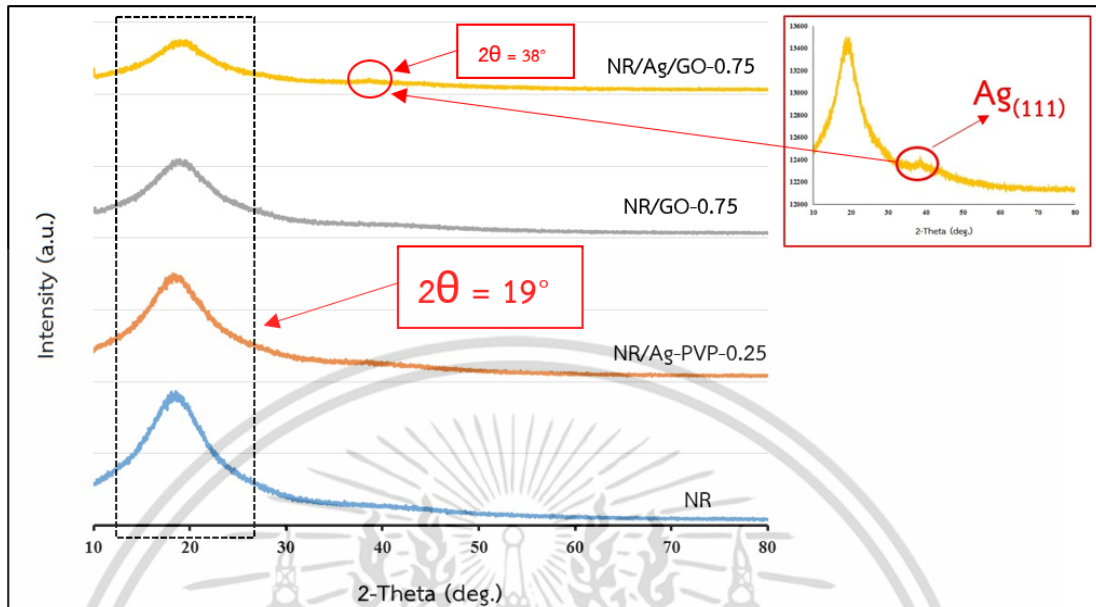
เทคนิค X-ray Diffractometer หรือ XRD เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกขององค์ประกอบที่อยู่ในวัสดุ ซึ่งจะเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในลักษณะที่แตกต่างกันโดยลักษณะการเลี้ยวเบนจะเป็นเอกลักษณ์ของผลึกแต่ละแบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำผลจากเทคนิค XRD มาช่วยในการยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของแผ่นของผสมที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟ XRD pattern ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นของผสมในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.75 และ NR/Ag-PVP-1.25 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) เปรียบเทียบกับแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติตามเงื่อนไข PVP-0.25 PVP-0.75 และ PVP-1.25 ตามลำดับ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ 2θ เท่ากับ 19° ซึ่งเป็นพีคที่เป็นแถบกว้างเนื่องจากการเลี้ยวเบนของยางธรรมชาติซึ่งมีลักษณะเป็นอสัณฐาน [58] แต่ไม่พบพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์ของซิลเวอร์ เนื่องจากได้เติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่น้อยมากๆ เมื่อเทียบกับปริมาณของน้ำยางธรรมชาติ ทำให้ยากต่อการตรวจวัดส่งผลให้ไม่ขึ้นพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของซิลเวอร์ แต่จะสามารถสังเกตได้จากค่า Intensity ของวัสดุผสมยางธรรมชาติมีค่าลดลงตามเงื่อนไข PVP-0.25 PVP-0.75 และ PVP-1.25 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณ PVP ที่ใช้ในการสังเคราะห์มากขึ้นจะทำให้ได้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นมาก จึงทำให้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อของแผ่นยางธรรมชาติไปบดบังการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แต่ละโมเลกุลของเนื้อยางธรรมชาติ จึงทำให้สังเกตเห็นพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติลดลงตามปริมาณสัดส่วน PVP ที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับ

4.2.1.7 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ของแผ่นของผสม NR/AgNPs/GO ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกััน

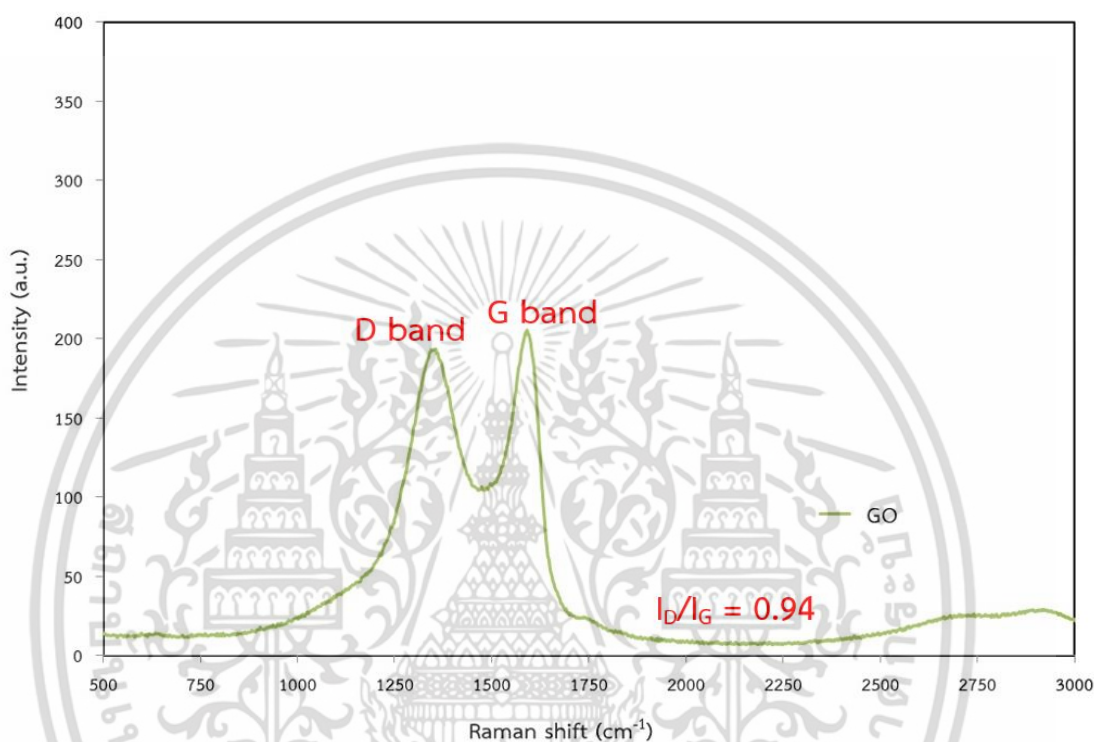


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟ XRD ของแผ่น NR, NR/Ag-PVP-0.25, NR/GO-0.75 และ NR/Ag/GO-0.75 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.15 แสดงกราฟ XRD ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) เปรียบเทียบกับเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.75, NR/Ag/PVP-0.25 และ NR/GO-0.75 ตามลำดับ พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ 2θ เท่ากับ 19° ซึ่งเป็นพีคที่เป็นแถบกว้างเนื่องจากการเลี้ยวเบนของยางธรรมชาติซึ่งมีลักษณะเป็นอสัณฐาน ส่วนพีคของกราฟีนออกไซด์นั้นถูกบดบังด้วยพีคของยางธรรมชาติ และจากพีคของตัวอย่างแผ่นของผสม NR/Ag/GO-0.75 จะสามารถสังเกตเห็นพีคโครงสร้างผลึกซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ $2\theta = 38^\circ$ ของเฟส (111) [59] เปรียบเทียบกับแผ่นของผสมในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25 ที่ไม่สามารถสังเกตเห็นพีคเอกลักษณ์ของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากเทคนิค SAED ที่สามารถพบเฟส (220) (200) (311) และ (111) ซึ่งเป็นการยืนยันการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนผลึกลักษณะ face-centred-cubic หรือ (fcc) อ้างอิงจาก (JCPDS, File No.04-0783) [52] ทั้งนี้เนื่องมาจากแผ่นของผสมในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.75 มีการเติมสารกราฟีนออกไซด์ลงไป โดยกราฟีนออกไซด์จะสามารถเป็นตัวช่วยทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการกระจายตัวได้ดีในเนื้อยางธรรมชาติมากยิ่งขึ้นทำให้สามารถสังเกตเห็นพีคเอกลักษณ์ของสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้

4.2.1.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Raman ของกราฟีนออกไซด์

เทคนิครามาน หรือ Raman Spectroscopy ถูกนำมาใช้ประกอบเพื่อยืนยันโครงสร้างผลึกของกราฟีนออกไซด์ โดยกราฟีนออกไซด์จัดเป็นสารที่มีโครงสร้างแบบสมมาตร หรือ symmetry อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้เทคนิค Raman Spectroscopy ในการตรวจวัดโครงสร้างที่เป็นเอกลักษณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้กราฟ Raman spectra ในการยืนยันโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.16

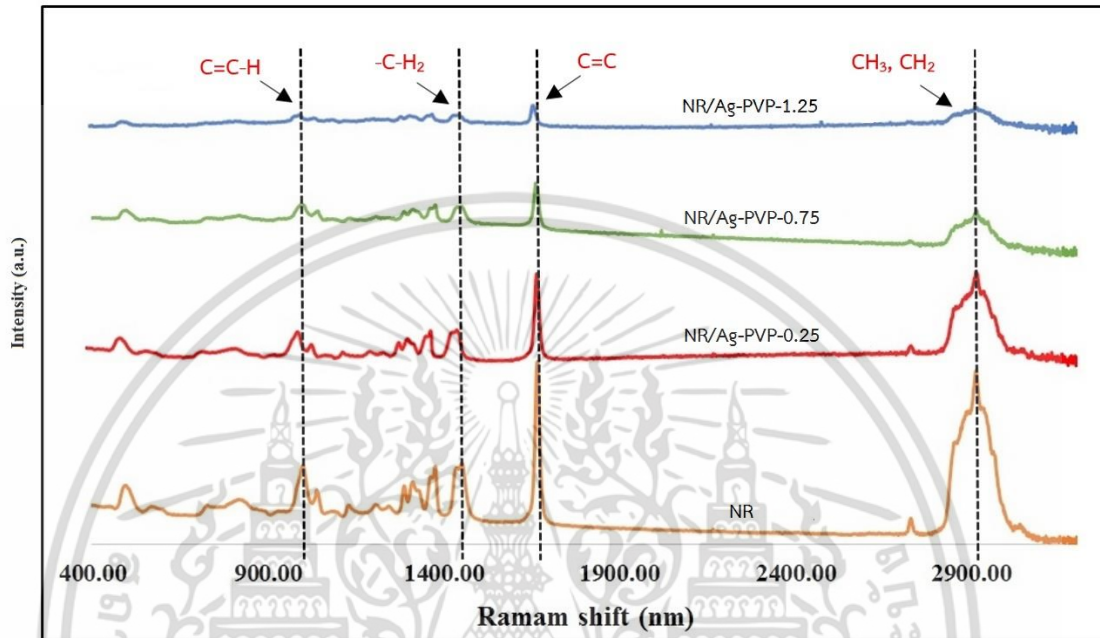


รูปที่ 4.16 แสดง Raman spectra ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิครามานในสารอนุพันธ์ของคาร์บอนในกราฟีนออกไซด์ จะมีพีคที่ได้รับความสนใจอยู่ 2 พีค นั่นก็คือ G band (graphitic carbon band) และ D band (defect graphitic carbon band) โดยที่ G band แสดงถึงความเป็นผลึกและความเป็นระเบียบของโครงสร้าง ซึ่งตรงกันข้ามกับ D band ที่แสดงถึงความบกพร่อง (defect) และความเป็นระเบียบ (disorder) ของโครงสร้าง ในส่วนของกราฟไฟต์จะมีอัตราส่วนระหว่าง D band ต่อ G band หรือ I_D/I_G เท่ากับ 0.17 เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นระเบียบและมีความเป็นผลึกสูงจึงมีค่า I_D/I_G เพียงเล็กน้อย จากในรูปที่ 4.18 พบว่ากราฟีนออกไซด์มีค่า I_D/I_G ที่สูงขึ้นอยู่ที่ 0.94 ซึ่งมาจากการที่โครงสร้างกราฟไฟต์ถูกออกซิเดชันให้มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เพิ่มขึ้นทำให้ความไม่เป็นระเบียบมีมากขึ้น [56]

4.2.1.9 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Raman ของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน

เทคนิค Raman spectroscopy หรือ Raman ใช้ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในวัสดุ โดยใช้หลักการกระเจิงของแสงในแต่ละโมเลกุล ซึ่งจะมีลักษณะของการกระเจิงแสงโพ-ตอนลักษณะที่ต่างกัน โดยเฉาะโมเลกุลที่มีลักษณะสมมาตร (symmetry) ดังรูปที่ 4.19



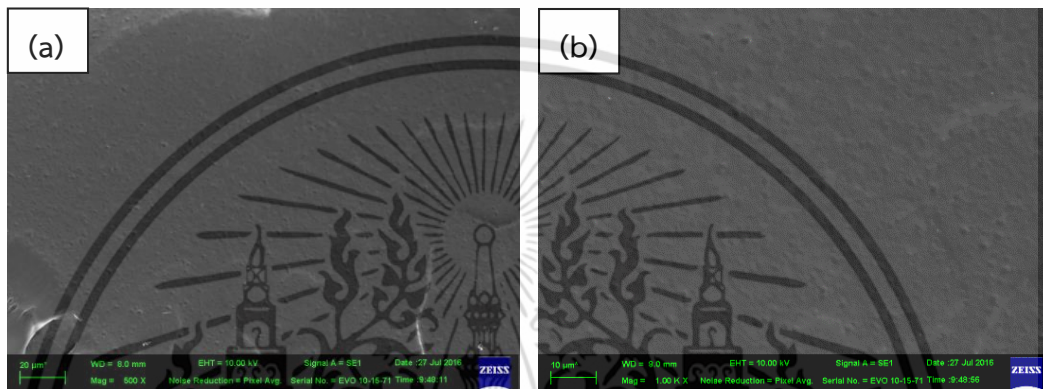
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟ Raman spectra ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นของผสมในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.75 และ NR/Ag-PVP-1.25 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.17 แสดง Raman spectra ของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติม AgNPs ที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการตรวจวัดเอกลักษณ์เฉพาะของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงของแต่ละพันธะในแต่ละโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในสารตัวอย่างเพื่อทำการยืนยันเฟสและยืนยันโครงสร้างที่เกิดขึ้น จากกราฟข้างต้นจะพบโหมมดการ สันที่เลขคลื่นรามาน (Raman shift) ตรงกับ 990 1450 1650 cm^{-1} และช่วงประมาณ $2800 - 3000$ cm^{-1} ซึ่งพิกที่ตำแหน่งนี้แสดงเอกลักษณ์ของยางไอโซพรีนในโครงสร้างของแผ่นยางธรรมชาติ [58] แต่จะไม่พบโหมมดการสันของอนุภาคซิลเวอร์นาโน เนื่องจากมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่น้อยมากๆ เมื่อเทียบกับปริมาณของน้ำยางธรรมชาติ ทำให้ยากต่อการตรวจวัดส่งผลให้ไม่ขึ้นพิกที่เป็นเอกลักษณ์ของซิลเวอร์นาโน แต่จากกราฟข้างต้นจะสามารถสังเกตได้ว่าค่า intensity ของพิกเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติจะมีค่าลดลง และจะลดลงมากเมื่อเติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากสัดส่วนปริมาณ PVP ที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณ PVP ที่ใช้ในการสังเคราะห์มากขึ้นจะทำให้ได้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นมาก จึงทำให้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่แทรกอยู่ในเนื้อของแผ่นยางธรรมชาติไปบดบังการกระเจิงของแสงของแต่ละพันธะในแต่ละโมเลกุลของเนื้อยางธรรมชาติ ทำให้สังเกตเห็นพิกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติลดลงตามปริมาณสัดส่วน PVP ที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับ

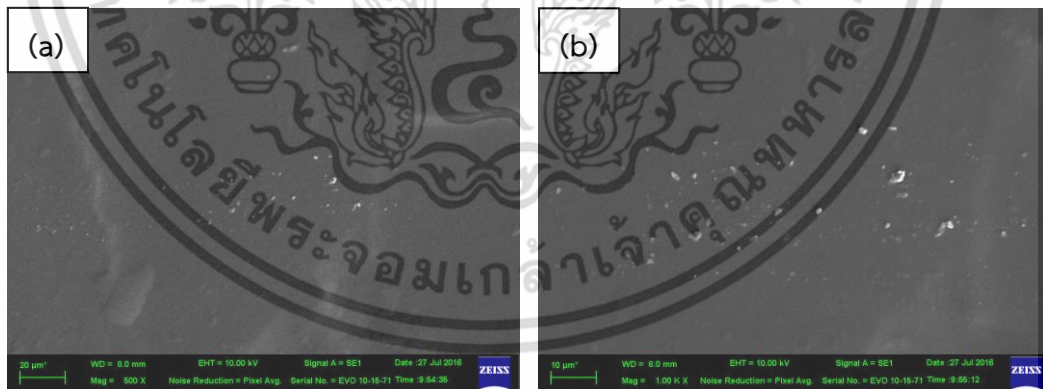
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.10 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาคของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน

เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวเนื้อภายใน (Cross-section) ของวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM เพื่อศึกษาความแตกต่างภายในเนื้อวัสดุ โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติ กับวัสดุผสมยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังนี้

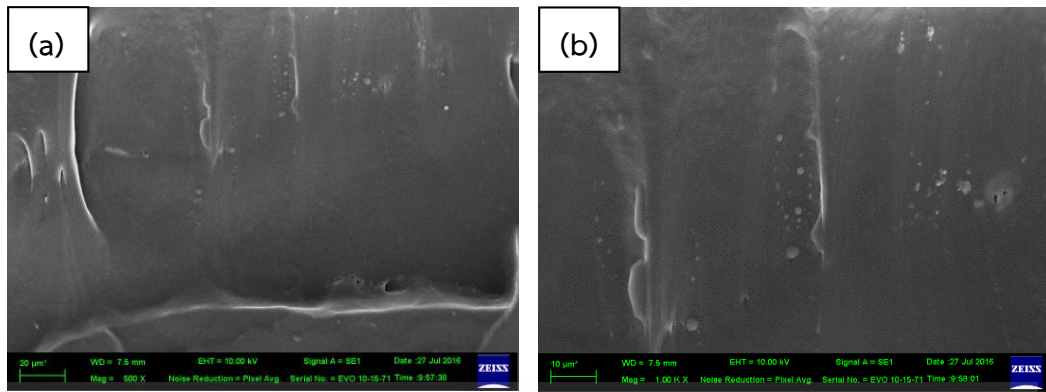


รูปที่ 4.18 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า

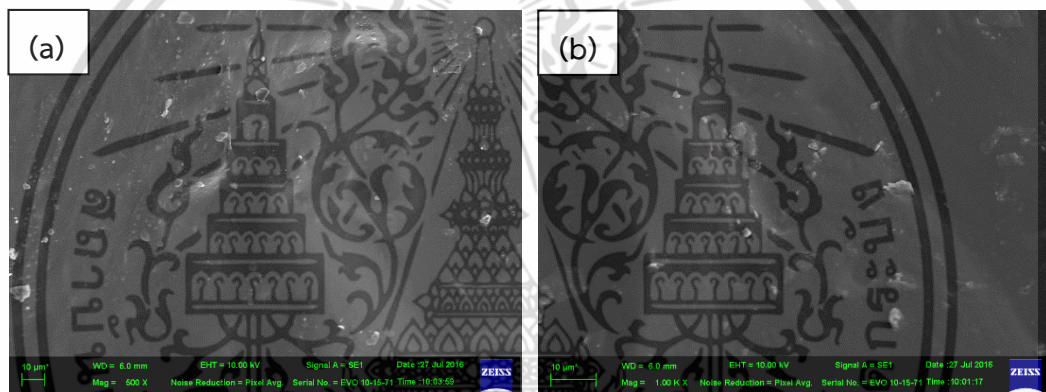


รูปที่ 4.19 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเจื่อนไซ NR/Ag-PVP-0.75 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า

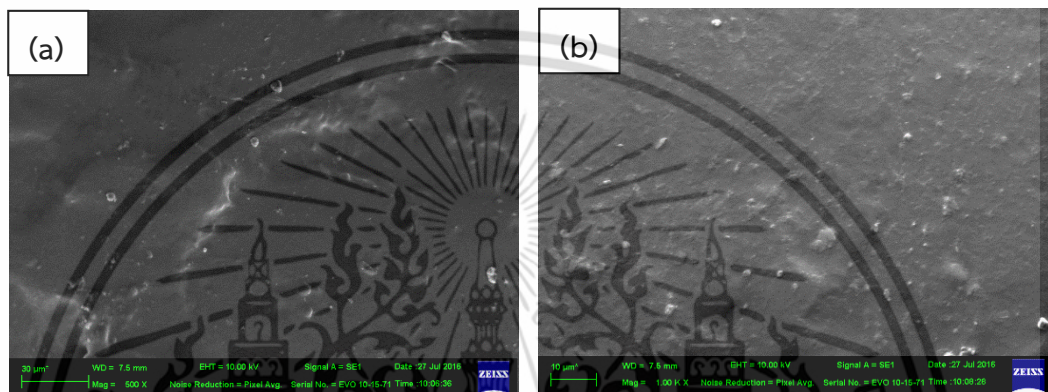


รูปที่ 4.21 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเจื่อนไซ NR/Ag-PVP-1.25 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า

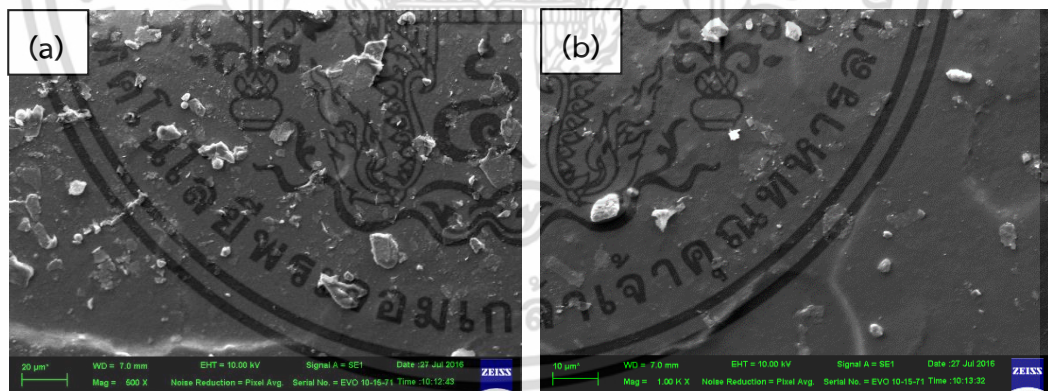
จากรูปที่ 4.18 แสดงภาพจากกล้อง SEM บริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า กับ 1000 เท่า พบว่าภายในเนื้อแผ่นยางธรรมชาติจะมีลักษณะเรียบเนียนไม่ขรุขระ และไม่มีสิ่งเจือปน ส่วนรูปที่ 4.19 – 4.21 แสดงภาพจากกล้อง SEM บริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า กับ 1000 เท่า ในเจื่อนไซ PVP-0.25 PVP 0.75 และ PVP 1.25 ตามลำดับ พบว่าภายในเนื้อของแผ่นวัสดุผสมจะมีลักษณะขรุขระ และสังเกตเห็นก้อนอนุภาคฝังอยู่ในเนื้อยางธรรมชาติ และจะเพิ่มมากขึ้นตามแนวโน้มของความเข้มข้นของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เติมลงไปตามเจื่อนไซ PVP-0.25 PVP 0.75 และ PVP 1.25 ตามลำดับ ดังนั้นจากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่ามีการฝังตัวของก้อนอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เติมลงไปและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์

4.2.1.11 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาคของแผ่นของผสม NR/AgNPs/GO ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวเนื้อภายใน (Cross-section) ของวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และกราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักแตกต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM เพื่อศึกษาความแตกต่างภายในเนื้อวัสดุ โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติ กับวัสดุผสมยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และกราฟีนออกไซด์ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังนี้



รูปที่ 4.22 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.25 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า

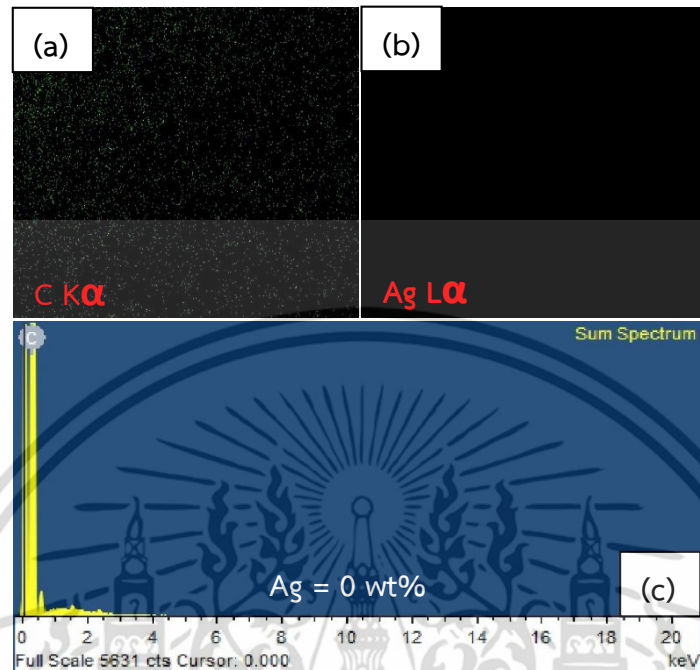


รูปที่ 4.23 ภาพจากกล้อง SEM แสดงบริเวณเนื้อภายใน (Cross-section) ของแผ่นวัสดุผสมธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.75 ที่กำลังขยาย (a) x500 เท่า (b) x1000 เท่า

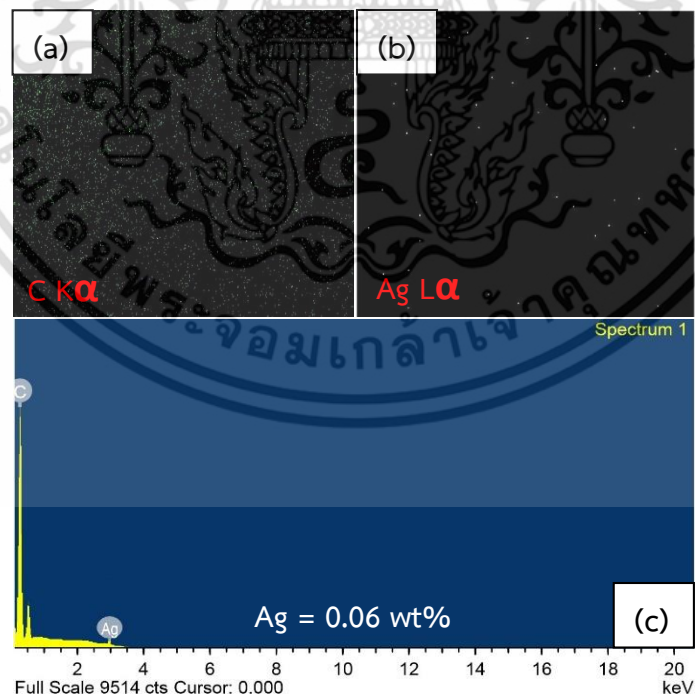
จากรูปที่ 4.22 กับ 4.23 จะเป็นภาพบริเวณเนื้อภายในของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติที่ผสมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 0.25 และ 0.75 wt% ตามลำดับ จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าผิวภายในจะมีลักษณะขรุขระมากขึ้น และเนื้อเยื่อจะมีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ดคล้ายกับแผ่นของกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น แสดงถึงแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่ผสมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

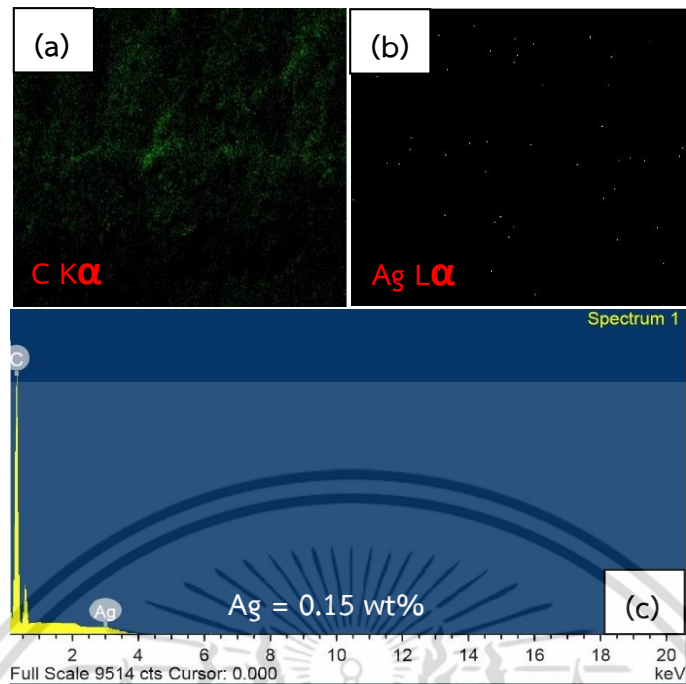
4.2.1.12 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDX ของแผ่นของผสม NR/AgNPs-PVP ที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณ PVP ที่แตกต่างกัน



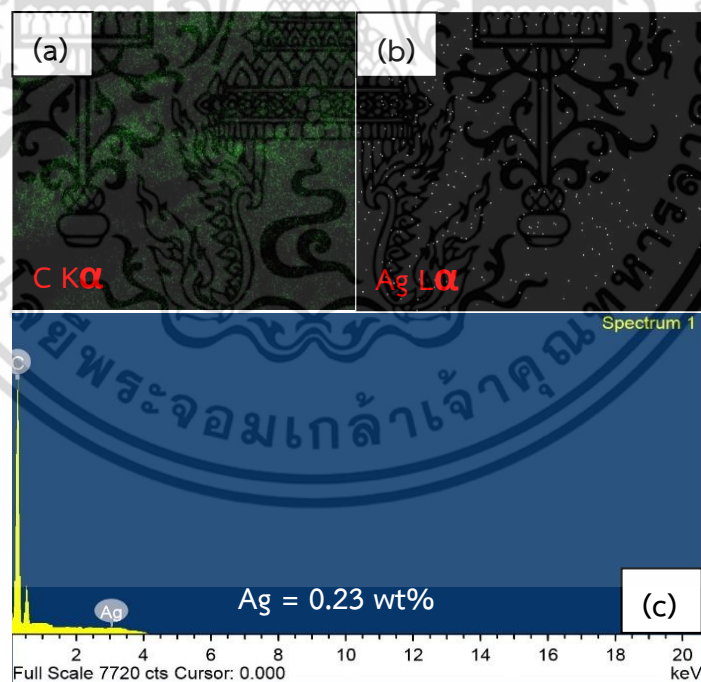
รูปที่ 4.24 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติ (c)



รูปที่ 4.25 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25 (c) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.75 (c)

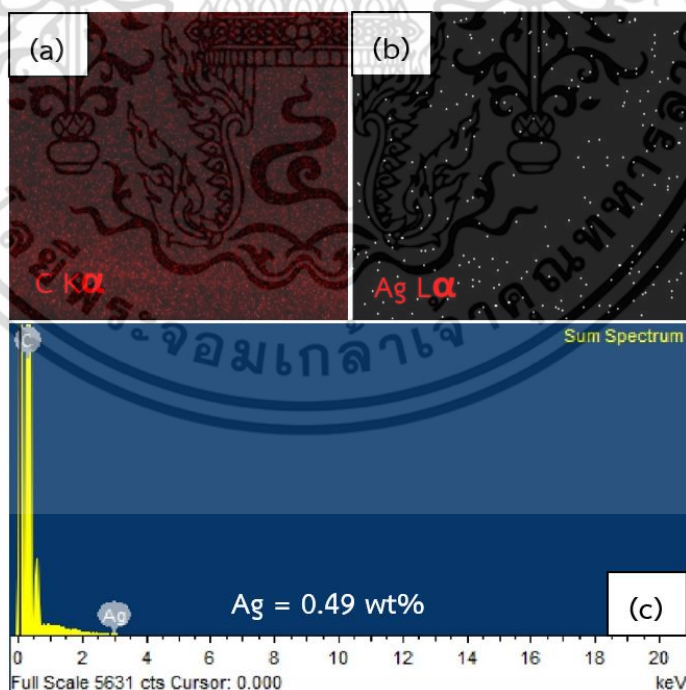


รูปที่ 4.27 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag-PVP-1.25 (c)

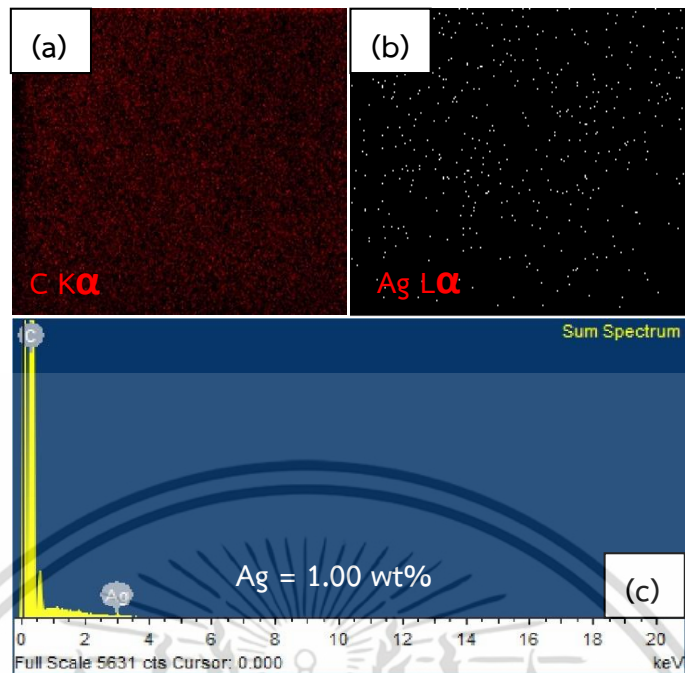
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.24 แสดงภาพ EDX Mapping จะพบธาตุคาร์บอน (จุดสีเขียว) ซึ่งมีกระจายตัวอยู่ในเนื้อแผ่นยางธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากแผ่นยางธรรมชาติประกอบด้วยไอโซพรีน ซึ่งมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นธาตุซิลเวอร์เนื่องจากยังไม่มีสารเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไป และรูป 4.24 (c) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นยางธรรมชาติ ซึ่งก็สามารถสังเกตเห็นได้เพียงแค่พีคของธาตุคาร์บอนที่ประมาณ 0.4 eV [58] เท่านั้น และจากรูปที่ 4.25 – 4.27 แสดงภาพ EDX Mapping จะสามารถสังเกตเห็นธาตุซิลเวอร์ (จุดสีขาว) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ เนื่องจากมีการเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไปในเรื่องไนโซ PVP-0.25 PVP 0.75 และ PVP 1.25 ตามลำดับ และรูป 4.25 - 4.27 (c) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ ซึ่งก็สามารถสังเกตเห็นทั้งพีคของธาตุคาร์บอนและพีคของธาตุซิลเวอร์ ที่ประมาณ 0.4 eV และ 3.0 V ตามลำดับ [59] และจากสเปกตรัมองค์ประกอบของธาตุพบว่าปริมาณธาตุซิลเวอร์ที่พบจะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามเรื่องไนโซ PVP-0.25 PVP 0.75 และ PVP 1.25 ซึ่งคิดเป็น 0.06 0.15 และ 0.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังนั้นจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy หรือ EDX สามารถยืนยันปริมาณและการกระจายตัวของธาตุซิลเวอร์ ในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติได้ และพบว่าปริมาณของธาตุซิลเวอร์ที่พบจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามเรื่องไนโซ PVP-0.25 PVP 0.75 และ PVP 1.25 ตามลำดับ

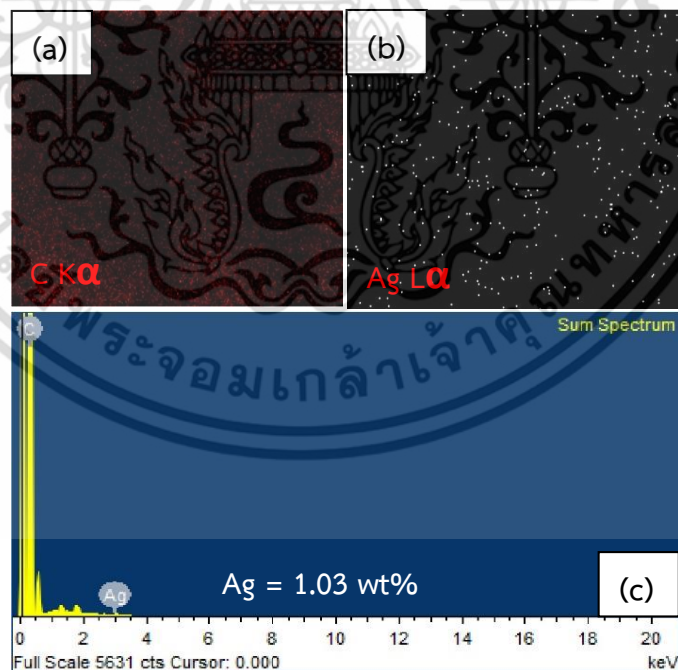
4.2.1.13 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDX ของแผ่นของผสม NR/AgNPs/GO ที่ผสมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.28 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และสเปกตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเรื่องไนโซ NR/Ag/GO-0.25 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.50



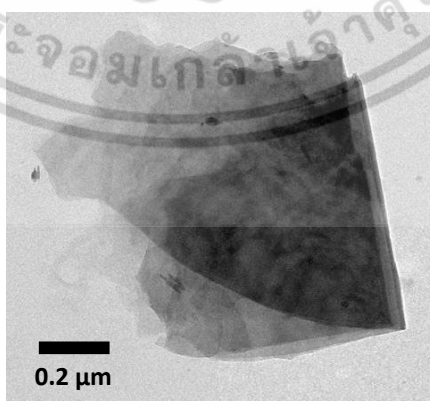
รูปที่ 4.30 แสดงภาพ EDX mapping ของธาตุคาร์บอน (a) และซิลเวอร์ (b) และเปคตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไข NR/Ag/GO-0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.28 – 4.30 (a, b) แสดงภาพ EDX Mapping จะพบธาตุคาร์บอน (จุดสีแดง) ซึ่งมีกระจายตัวอยู่ในเนื้อแผ่นยางธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับแผ่นยางธรรมชาติ เนื่องจากแผ่นยางธรรมชาติประกอบด้วยไอโซพรีน ซึ่งมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และจะสามารถสังเกตเห็นธาตุซิลเวอร์ (จุดสีขาว) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ เนื่องจากมีการเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลงไปในเรื่องไนซ์ PVP-0.25 และรูป 4.28 - 4.30 (c) แสดงสเปกตรัมองค์ประกอบของธาตุในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ ซึ่งก็สามารถสังเกตเห็นทั้งพีคของธาตุคาร์บอนและพีคของธาตุซิลเวอร์ ที่ประมาณ 0.4 eV และ 3.0 V ตามลำดับ [59] และจากสเปกตรัมองค์ประกอบของธาตุพบว่าปริมาณธาตุซิลเวอร์ที่พบจะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามเงื่อนไขของกราฟีนออกไซด์ 0.25 0.50 และ 0.75 ซึ่งคิดเป็น 0.49 1.0 และ 1.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นจะสังเกตได้ว่าในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์ จะพบธาตุซิลเวอร์ในปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มากกว่า แผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมเพียงสารซิลเวอร์นาโน ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนไปเกาะอยู่บนแผ่นกราฟีนออกไซด์ ซึ่งกราฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อยางธรรมชาติ [55] จึงทำให้สามารถเห็นธาตุซิลเวอร์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy หรือ EDX สามารถยืนยันปริมาณและการกระจายตัวของธาตุซิลเวอร์ ในแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติได้ และพบว่าปริมาณของธาตุซิลเวอร์ที่พบจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามเงื่อนไขของกราฟีนออกไซด์ที่ 0.25 0.50 และ 0.75 ตามลำดับ

4.2.1.14 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะกราฟีนออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง Transmission electron microscope หรือเทคนิค TEM ในการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์ จากรูปสามารถแสดงให้เห็นชัดเจนในเรื่องลักษณะเป็นแผ่นเกล็ดและความหนาของสารกราฟีนออกไซด์ [57] โดยที่กราฟีนออกไซด์ที่มีความหนามากเนื่องมาจากการที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆบนระนาบ สามารถทำพันธะกันเองกับหมู่ฟังก์ชันบนระนาบอื่นๆ จึงทำให้เกิดลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติตั้งเงื่อนไขที่แสดงในบทที่ 3 โดยเตรียมด้วยวิธีผสมและขึ้นรูปอย่างง่าย (Latex mixing and casting method) ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมวัสดุจากยางธรรมชาติที่สะดวก และรวดเร็ว โดยการนำสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีน-ออกไซด์สังเคราะห์ได้ ผสมกับน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60% HA ในปริมาณ 6 mL ตามลำดับ จากนั้นเทลงแบบจานเพาะเชื้อและทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นแกะออกจากแบบจะได้แผ่นของผสมจากยางธรรมชาติดังรูปที่ 4.32 และ 4.34

4.2.2.1 ลักษณะแผ่นของผสมยางธรรมชาติและสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน



รูปที่ 4.32 แสดงภาพถ่ายของแผ่นยางธรรมชาติ (ซ้าย) และแผ่นยางธรรมชาติผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนในอัตราส่วนเงื่อนไข Ag/PVP-1.00 (ขวา)

จากรูปที่ 4.32 แสดงภาพถ่ายของแผ่นยางธรรมชาติ (ซ้าย) และแผ่นยางธรรมชาติผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน (ขวา) เปรียบเทียบกัน พบว่าแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถเตรียมได้จากวิธีการผสมและขึ้นรูปอย่างง่าย และสังเกตได้ว่าแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะมีสีของแผ่นออกไปทางสีส้มน้ำตาลสม่ำเสมออยู่ทั่วแผ่น ซึ่งจะแตกต่างจากแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนอย่างสิ้นเชิง และสีที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนซึ่งมีสีน้ำตาลส้มลงไปในตัว ซึ่งแสดงถึงสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถมีการกระจายตัวได้ดีในแผ่นยางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องมาจากสารเพิ่มเสถียรภาพให้กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน คือ พอลิไวนิลไพโรลิโดนนั้นจัดเป็นสารที่มีความสามารถเป็นทั้งสารมีขั้วและสารไม่มีขั้ว [54] ซึ่งส่วนที่มีขั้วจะทำให้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนกระจายตัวได้ดีในน้ำยางธรรมชาติ และส่วนที่ไม่มีขั้วจะทำให้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนกระจายตัวได้ดีในเนื้อยางธรรมชาติ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของเนื้อยางธรรมชาติ ได้แก่ cis-1, 4- polyisoprene ที่ไม่มีขั้ว ซึ่งจากเหตุผลข้างต้นนี้จึงทำให้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพสามารถกระจายตัวได้ดีในแผ่นยางธรรมชาติ

4.2.2.2 ลักษณะของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

กราฟีนออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เตรียมได้จากกระบวนการรีดักชันทางเคมี จากกระบวนการดัดแปลงของฮูมเมอร์ และตามด้วยกระบวนการโซนิเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.33 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์จะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะช่วยลดขั้นตอนในการสังเคราะห์ และลดชนิดของสารเคมีที่ใช้จึงทำให้สามารถสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ได้สะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.33 แสดงรูปสารกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการดัดแปลงของฮูมเมอร์

4.2.2.3 ลักษณะแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์



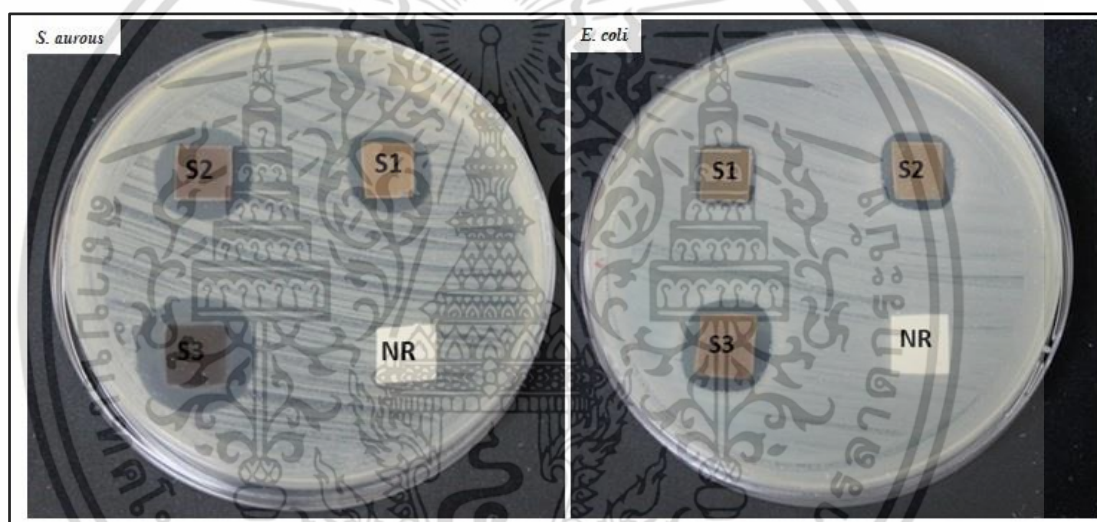
รูปที่ 4.34 แสดงภาพถ่ายของแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน (ซ้าย) และแผ่นยางธรรมชาติผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ในเงื่อนไข Ag/GO-0.75

จากรูปที่ 4.34 แสดงภาพถ่ายของแผ่นยางธรรมชาติ (ซ้าย) และแผ่นยางธรรมชาติผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ (ขวา) เปรียบเทียบกัน พบว่าแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์สามารถเตรียมได้จากวิธีการผสมและขึ้นรูปอย่างง่ายได้เช่นกัน และสังเกตได้ว่าแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์จะมีสีของแผ่นออกไปทางสีน้ำตาลดำสม่ำเสมออยู่ทั่วแผ่น เนื่องจากการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปซึ่งจะแตกต่างจากแผ่นยางธรรมชาติ โดยลักษณะสีของแผ่นที่สังเกตเห็นเกิดจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่กราฟีนออกไซด์เกิดการกระจายตัวได้ดีในเนื้อเยื่อ ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนของการเตรียมได้ มีการผสมระหว่างสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนกับกราฟีนออกไซด์ก่อนที่จะผสมลงในน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพที่มีหมู่เอไมด์ (Amide group) ประกอบด้วยไนโตรเจนและออกซิเจน จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) ที่อยู่ในโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ได้ [55] โดยการผสมกราฟีนออกไซด์ลงไปในยางธรรมชาตินี้จะช่วยให้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถกระจายตัวได้ดีในแผ่นยางธรรมชาติมากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ในส่วนต่อไป

4.3 การศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ

4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณแตกต่างกัน

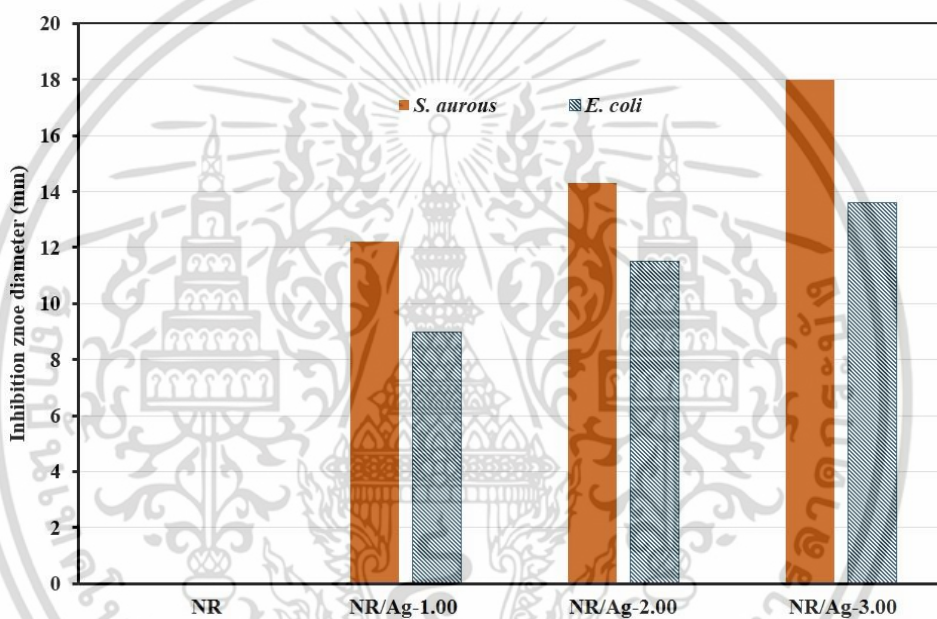


รูปที่ 4.35 แสดงภาพถ่ายประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดย NR คือ แผ่นยางธรรมชาติ และ S1-S3 คือ แผ่นของผสมในเงื่อนไข NR/Ag-1.00 - NR/Ag-3.00 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.35 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่างกันด้วยวิธี Agar disc diffusion ในปริมาณสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 1(S1) 2(S2) และ 3(S3) mL ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ (NR) โดยจะใช้เชื้อแบคทีเรียในการทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus* (แกรมบวก) และ *Escherichia coli* (แกรมลบ) จากการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณของสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในแผ่นยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณยับยั้งเชื้อ หรือ clear zone ที่เพิ่มมากขึ้นจาก S1-S3 ตามลำดับ เทียบกับแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่พบบริเวณยับยั้งเชื้อ และสามารถสังเกตได้ว่าแผ่นของผสมที่เตรียมได้มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อชนิดแกรมบวก (Gram-positive) ได้มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดแกรมลบ (Gram-negative) ทั้งนี้เนื่องมาจากกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นดังแสดงในบทที่ 2 เนื่องจากแบคทีเรียชนิดแกรมบวกมีลักษณะของผนังเซลล์ที่ Ag^+ สามารถแทรกเข้าไปในเซลล์ได้ง่ายกว่าเพราะที่ผนังเซลล์ของแกรมบวกไม่มีส่วนของ Outer membrane ซึ่งเป็นตัวกรองเลือกผ่านก่อนเข้าสู่เซลล์ และในส่วนของผนังเซลล์ของแกรมบวกรังมีส่วนที่เป็นขนที่เรียกว่า Teichoic acid ซึ่งมีความเป็นประจุลบจึงทำให้ Ag^+ สามารถเข้าไปเกาะที่ผนังเซลล์ของแกรมบวกได้ง่ายกว่าแบคทีเรียแกรมลบ [42] ดังนั้นแผ่นของผสมที่เตรียมได้จึงมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวกได้มากกว่าแกรมลบ และแผ่นของผสมจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมากขึ้นเมื่อผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยระยะบริเวณยับยั้งเชื้อ หรือ clear zone ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.36

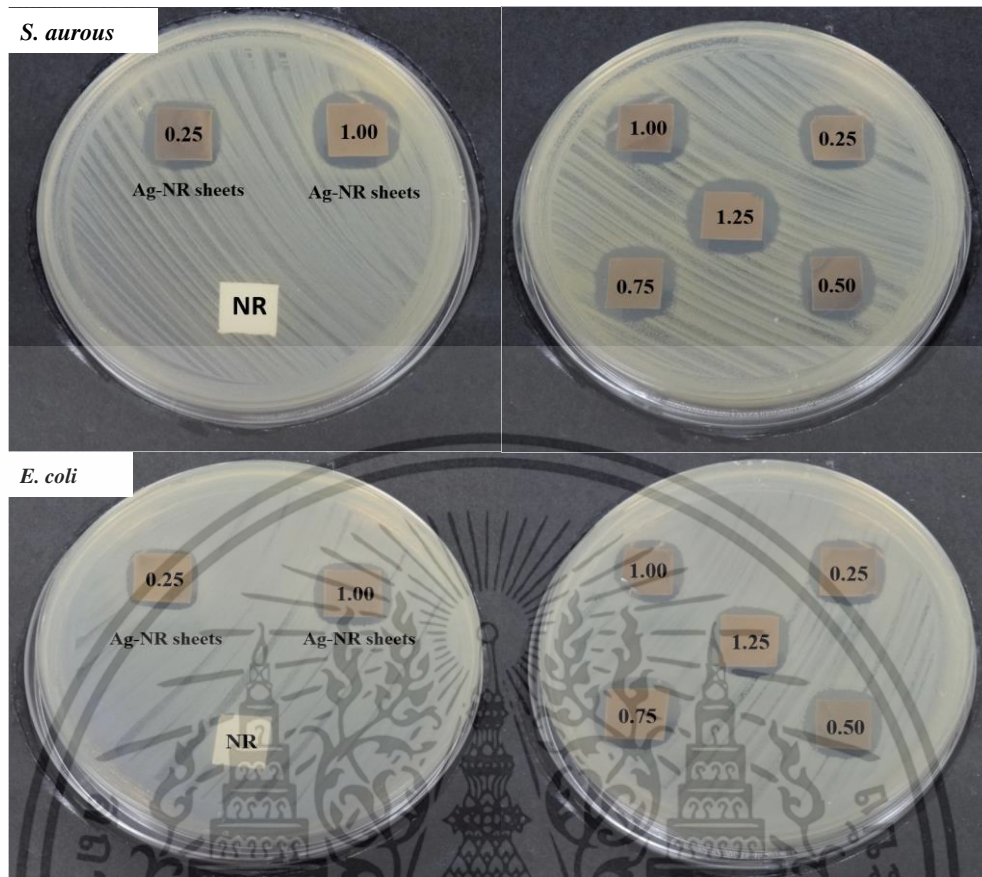


รูปที่ 4.36 แสดงค่าระยะบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวก และแกรมลบของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมลงไปปริมาณ 1 2 และ 3 mL ตามลำดับ

4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวโนลไพโรลิโดนที่แตกต่างกัน

ในส่วนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณพอลิไวโนลไพโรลิโดนที่แตกต่างกันด้วยวิธี Agar disc diffusion ในเงื่อนไข PVP-0.25, PVP-0.50, PVP-0.75, PVP-1.00 และ PVP-1.25 ตามลำดับ โดยเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณ 2 mL และเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ (NR) ซึ่งจะใช้เชื้อแบคทีเรียในการทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus* (แกรมบวก) และ *Escherichia coli* (แกรมลบ) แสดงดังรูป 4.37

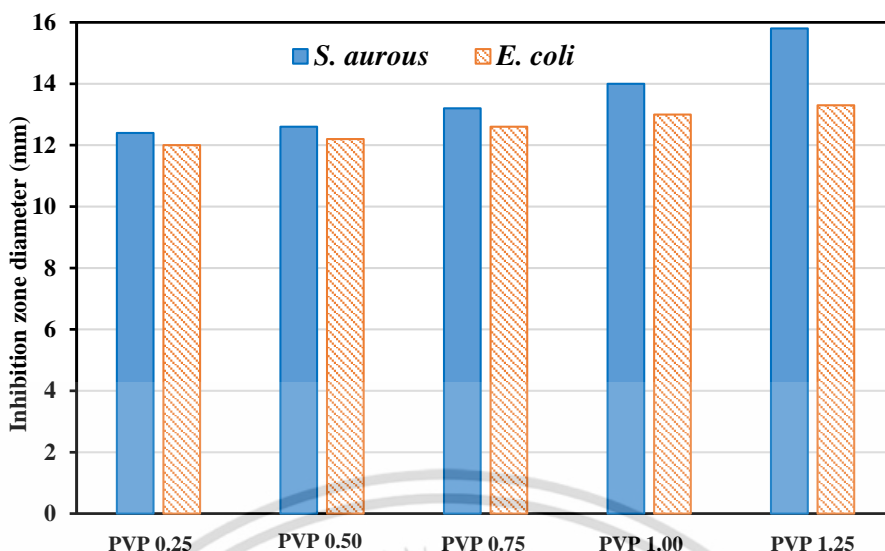
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 แสดงภาพถ่ายประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในเจื่อนไซ NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.50, NR/Ag-PVP-0.75 NR/Ag-PVP-1.00, NR/Ag-PVP-1.25 เทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ (NR)

จากผลการทดสอบรูปที่ 4.37 (ซ้าย) เปรียบเทียบระหว่างเจื่อนไซ PVP-0.25 PVP-1.25 และแผ่นยางธรรมชาติ (NR) แสดงให้เห็นว่าแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบ เมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติซึ่งไม่พบบริเวณยับยั้ง หรือ Clear zone และจากรูป 4.36 (ขวา) แสดงบริเวณยับยั้งเชื้อของวัสดุผสมในเจื่อนไซ PVP-0.25, PVP-0.50, PVP-0.75, PVP-1.00 และ PVP-1.25 ตามลำดับ พบว่าบริเวณยับยั้งเชื้อจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเจื่อนไซ PVP-0.25 ถึง PVP-1.25 เนื่องจากผลของความเข้มข้นของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ในส่วนการทดลองที่ 4.1 ดังนั้นแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติตามเจื่อนไซข้างต้น สามารถมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ซึ่งไม่พบบริเวณยับยั้ง และประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เติมลงไปมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าระยะบริเวณยับยั้งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.38

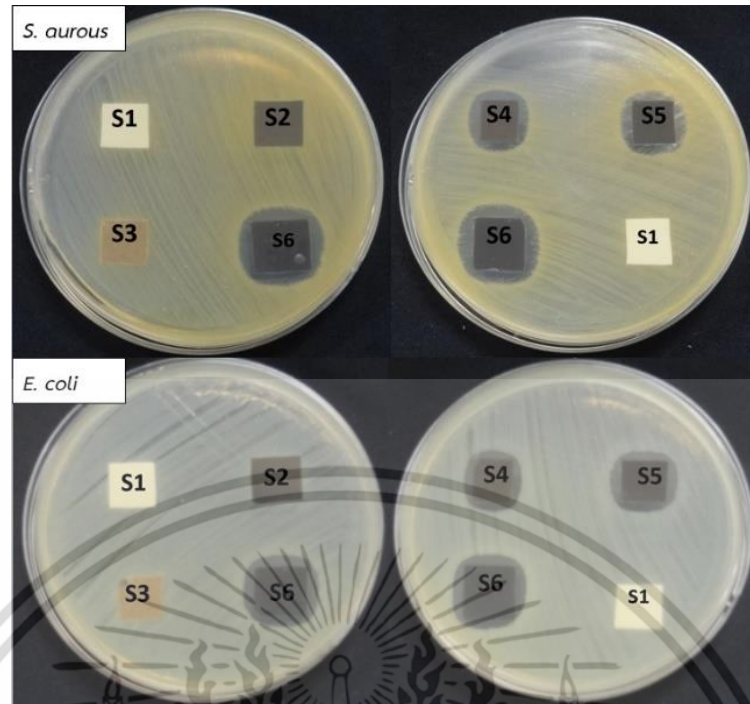
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



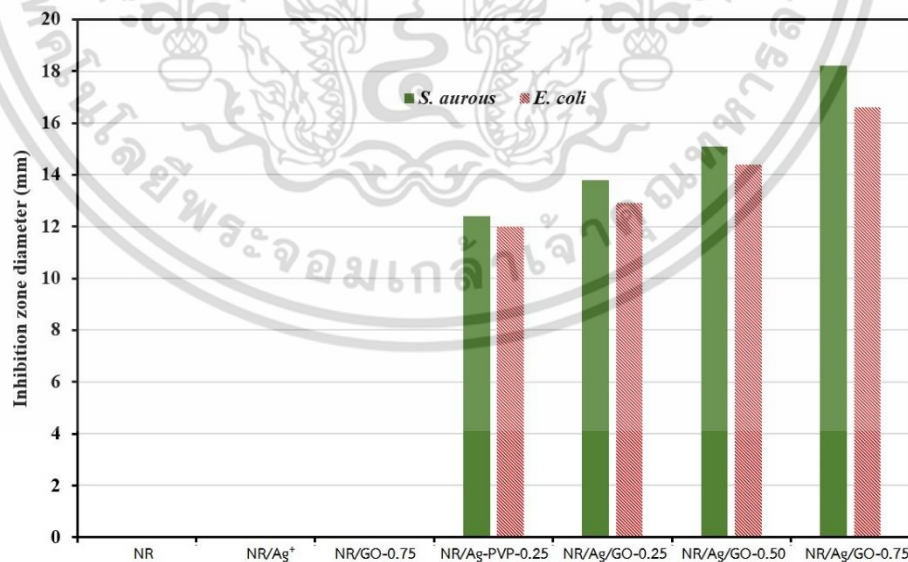
รูปที่ 4.38 แสดงค่าระยะบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวก และแกรมลบของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติตามเงื่อนไข NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag-PVP-0.50, NR/Ag-PVP-0.75, NR/Ag-PVP-1.00 และ NR/Ag-PVP-1.25 ตามลำดับ

4.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์

ในส่วนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติ และวัสดุผสมยางธรรมชาติทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน คือ แผ่นยางธรรมชาติ (NR) แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) แผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (GO) และแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.25 0.50 และ 0.75 โดยน้ำหนัก ($AgGO$) ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เชื้อแบคทีเรียในการทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus* (แกรมบวก) และ *Escherichia coli* (แกรมลบ) แสดงดังรูป 4.39 โดยแสดงผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. coli* ของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นวัสดุผสม ทั้ง 4 ชนิดเปรียบเทียบกัน พบว่า แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.25 0.50 และ 0.75 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดได้ดีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสารกราฟีนออกไซด์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนซึ่งเป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพให้กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน จึงทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนกระจายตัวได้ดีในเนื้อยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มสารกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.25 0.50 และ 0.75 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งในส่วนของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) และแผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (GO) จะไม่พบบริเวณยับยั้งเชื้อ ซึ่งวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ จะสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *S. aureus* ได้ดีกว่าแกรมลบ *E. coli* เช่นเดียวกับแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมอนุภาคซิลเวอร์นาโน



รูปที่ 4.39 แสดงภาพถ่ายประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. coli* ของแผ่นของผสมเปรียบเทียบกันระหว่าง ตัวอย่าง S1 คือ แผ่นยางธรรมชาติ, S2 คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมก-ราฟีนออกไซด์, S3 คือ แผ่นยางธรรมชาติผสมซิลเวอร์ไอออน (Ag^+), S4 คือ เจื่อนไซ NR/Ag/GO-0.25 S5 คือ เจื่อนไซ NR/Ag/GO-0.50 และ S6 คือ เจื่อนไซ NR/Ag/GO-0.75 ตามลำดับ



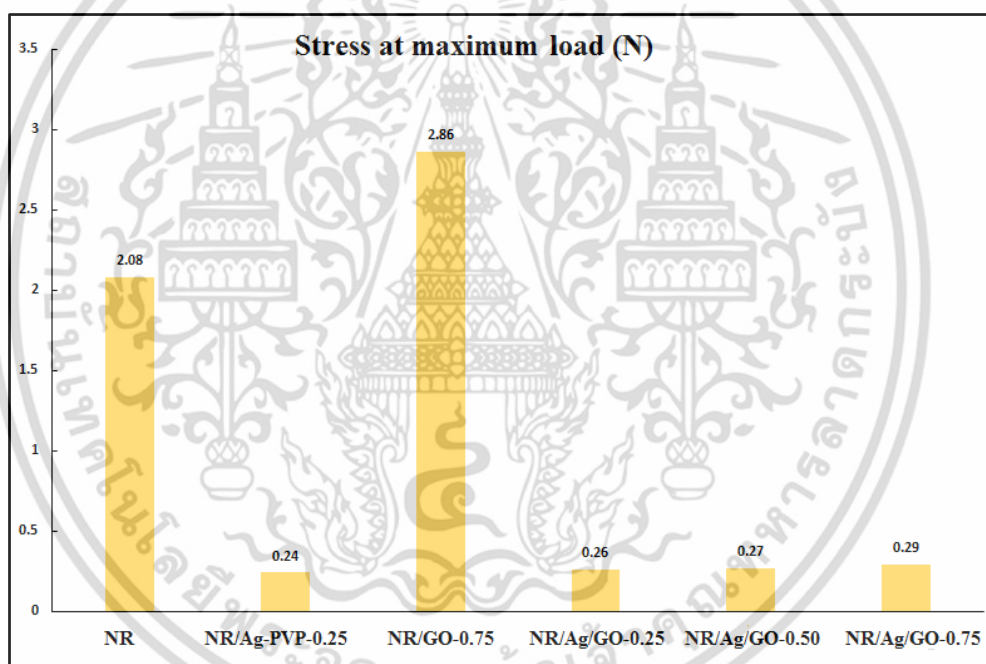
รูปที่ 4.40 แสดงค่าระยะบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวก และแกรมลบ ของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ NR, NR/Ag⁺, NR/GO-0.75, NR/Ag-PVP-0.25, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

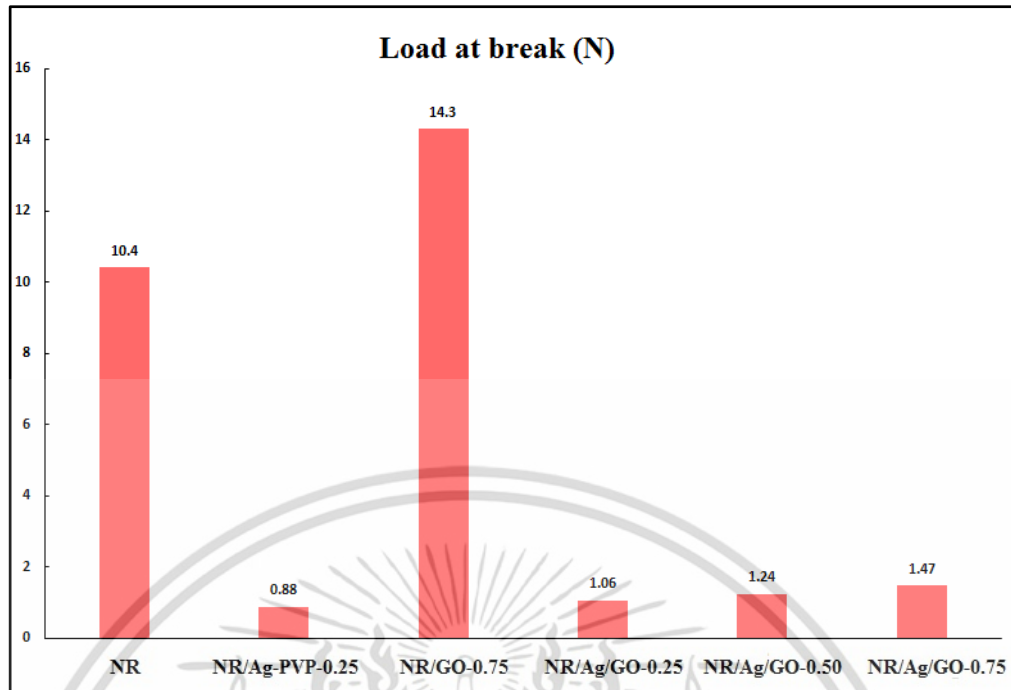
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพทางเชิงกล และสมบัติทางความร้อน

4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพทางเชิงกล

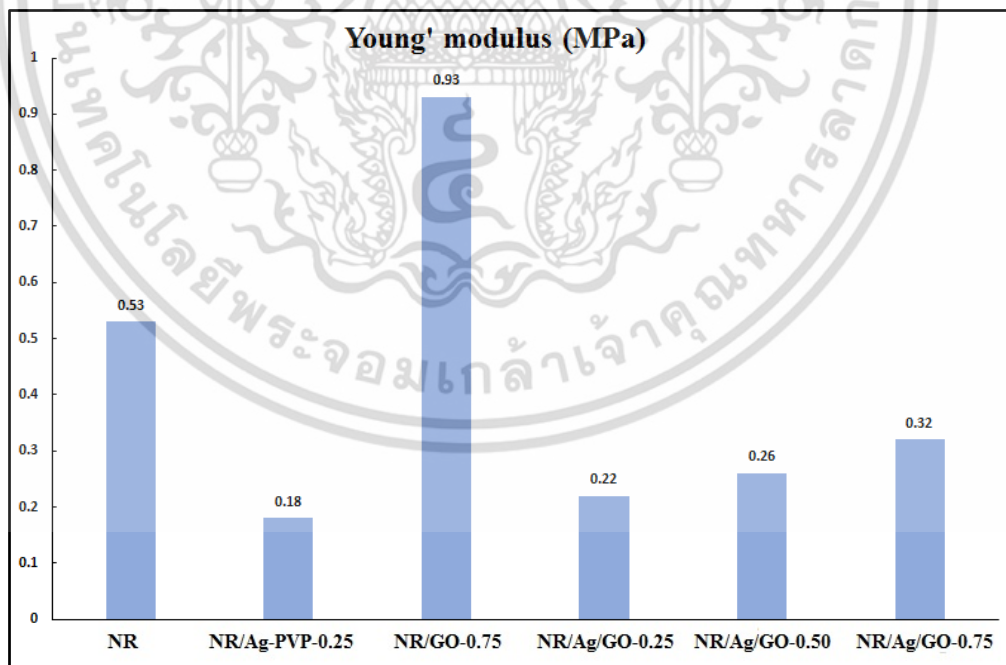
ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณสารกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปเป็นปริมาณ 0.25, 0.50 และ 0.75 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพทางเชิงกลของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ ที่ผสมซิลเวอร์นาโน ดังตารางที่ 3.3 (บทที่ 3) โดยจะทำการศึกษาความทนทานต่อแรงดึงยึดด้วยเครื่อง Universal testing machine ซึ่งในส่วนนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพทางเชิงกลเปรียบเทียบกันระหว่าง แผ่นยางธรรมชาติ (NR) แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ตามเงื่อนไข PVP-0.25 (Ag) แผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (GO) และแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.25 0.50 และ 0.75 โดยน้ำหนัก (AgGO) ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.41 แสดงค่าความเค้นที่โหลดสูงสุด (stress at maximum load) ของแผ่นยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบกันระหว่าง NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75

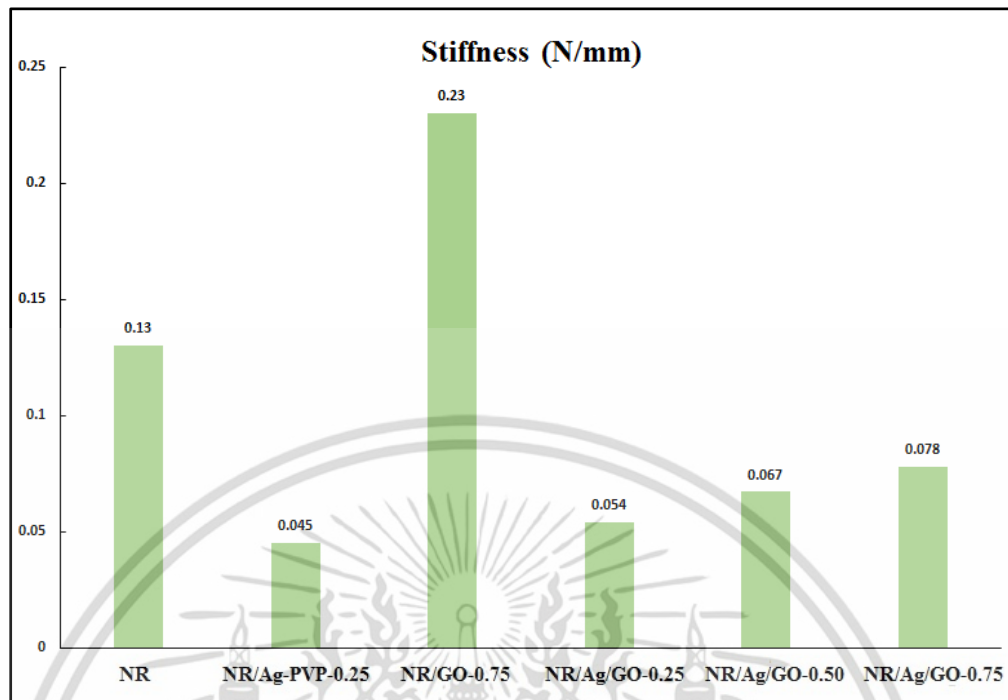


รูปที่ 4.42 แสดงค่ารับโหลดก่อนขาด (load at break) ของแผ่นยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบกับระหว่างเงินไซ NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75



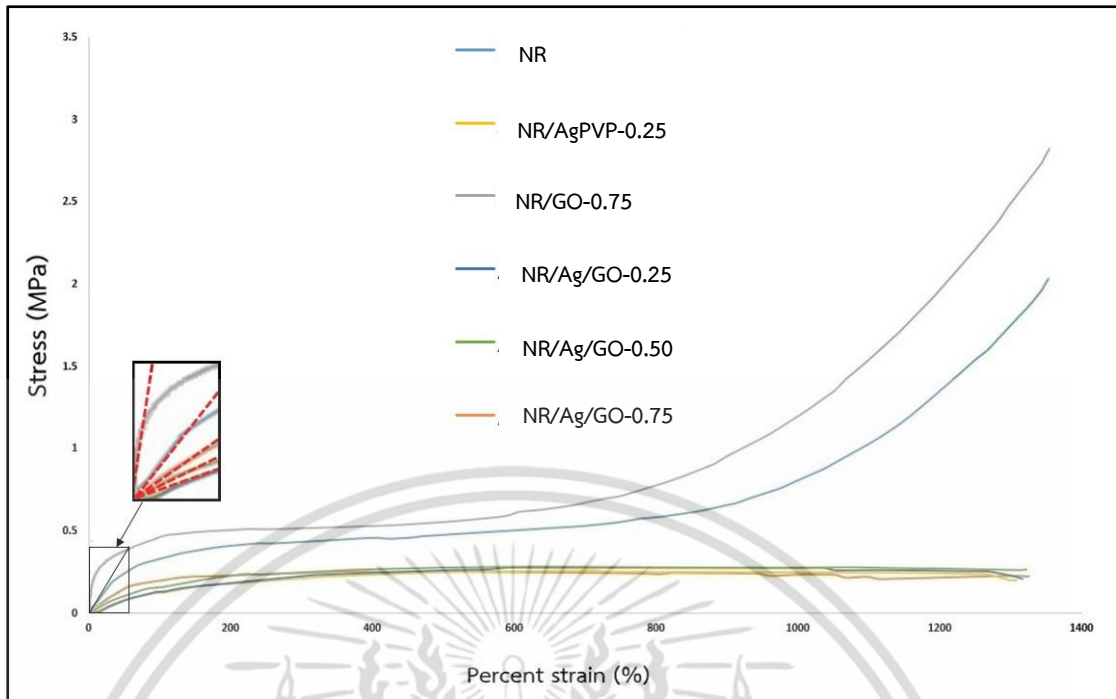
รูปที่ 4.43 แสดงค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) ของแผ่นยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบกับระหว่างเงินไซ NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-

0.75 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 แสดงค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของแผ่นยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบกับระหว่างเงื่อนไข NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75

จากรูปที่ 4.41 - 4.42 แสดงค่าความเค้นที่ไหลสูงสุด และค่ารับไหลก่อนขาด ของทั้ง 6 ตัวอย่างพบว่าทั้งค่าความเค้นที่ไหลสูงสุด และค่ารับไหลก่อนขาด ของแผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (GO) มีค่ามากที่สุด กล่าวคือ แผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ จะมีค่าทนต่อแรงดึง หรือค่าความเค้น (Stress) มากที่สุดเท่ากับ 2.86 นิวตัน และสามารถรับ load ก่อนที่วัสดุจะขาด (load at break) ได้มากที่สุดถึง 14.3 นิวตัน ซึ่ง เนื่องมาจาก สารกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปมีความแข็งแรงสูงทำให้แผ่นยางธรรมชาติที่ผสมสารกราฟีนออกไซด์ สามารถรับแรงและทนต่อแรงดึงได้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ (NR) และจากผลข้างต้น ของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมสารซิลเวอร์นาโน พบว่าจะมีค่าความสามารถในการรับแรงและทนต่อแรงดึง ต่ำที่สุด เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อยางธรรมชาติจะสามารถปล่อยซิลเวอร์ไอออน ซึ่งไปทำลายโครงสร้างโปรตีนในเนื้อยางธรรมชาติเมื่อวัสดุได้รับความชื้น จึงทำให้แผ่นวัสดุผสมแผ่นยางธรรมชาติผสมสารซิลเวอร์นาโนมีการเสื่อมสภาพได้รวดเร็ว แต่เมื่อเติมสารกราฟีนออกไซด์ลงไปแผ่นวัสดุผสมแผ่นยางธรรมชาติผสมสารซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่า ค่าความเค้นที่ไหลสูงสุด และค่ารับไหลก่อนขาด ของแผ่นวัสดุผสมจะมีค่าแนวโน้มที่ดีขึ้นจาก 0.26, 0.27, 0.29 และ 1.06 1.24 1.47 ตามปริมาณสารกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไป 0.25 0.50 และ 0.75 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงสารกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปวัสดุผสมแผ่นยางธรรมชาติผสมสารซิลเวอร์นาโนนั้นสามารถเพิ่มค่าความสามารถในการรับแรงและทนต่อแรงดึงได้



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับเปอร์เซ็นต์ความเครียดของแผ่นของผสมยางธรรมชาติ เปรียบเทียบกันระหว่างเงื่อนไข NR, NR/Ag, NR/GO, NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75

จากรูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับเปอร์เซ็นต์ความเครียดของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ตามเงื่อนไข PVP-0.25 (Ag) แผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (GO) และแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.25 0.50 และ 0.75 โดยน้ำหนัก (AgGO) ตามลำดับ พบว่าแผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (GO) จะมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile strength) ที่สูงที่สุดเท่ากับ 0.22 MPa เนื่องจากการมีเติมสารกราฟีนออกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้น [8] เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ (NR) และในส่วนของแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ตามเงื่อนไข PVP-0.25 (Ag) จะพบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด น้อยที่สุดเนื่องจากผลอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เติมลงไปดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่เมื่อได้มีการเติมสารกราฟีนออกไซด์ลงไปแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ตามเงื่อนไข PVP-0.25 (Ag) จะพบว่ามีแนวโน้มค่าความแข็งแรงดึงที่เพิ่มขึ้นดังรูป 4.43 ที่ปริมาณสารกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 0.25 0.50 และ 0.75 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดงถึงสารกราฟีนออกไซด์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางเชิงกลให้กับแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามลำดับถึงแม้จะมีค่าไม่มากก็ตาม โดยตารางที่ 4.1 แสดงค่าการทดสอบประสิทธิภาพทางเชิงกลต่างๆ

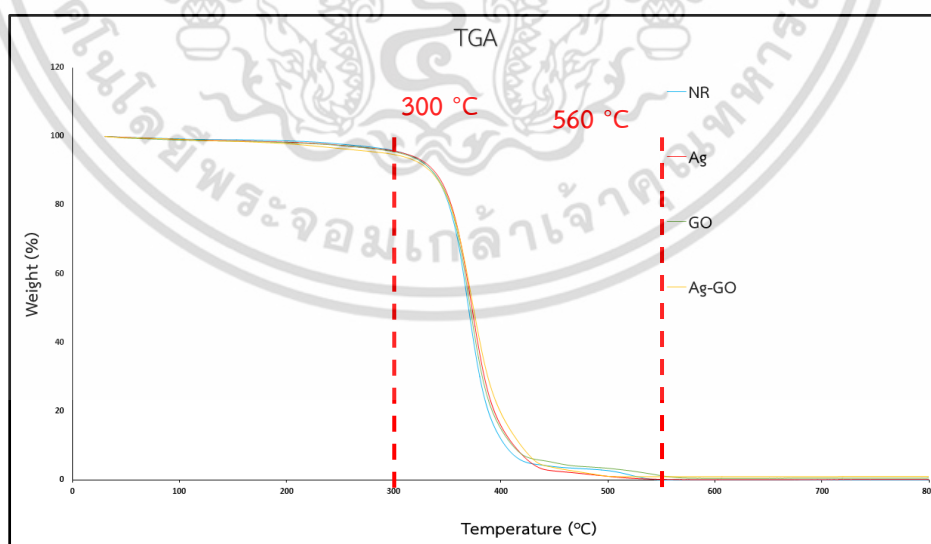
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการทดสอบทางเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นของผสมยางธรรมชาติ

Sample	Stress at maximum load (MPa)	Load at break (N)	Young' modulus (MPa)	Stiffness (N/mm)	Ultimate Tensile strength (MPa)
NR	2.08	10.4	0.53	0.13	0.160
NR/Ag	0.24	0.88	0.18	0.045	0.018
NR/GO	2.86	14.3	0.93	0.23	0.220
NR/Ag/GO-0.25	0.26	1.06	0.22	0.054	0.020
NR/Ag/GO-0.50	0.27	1.24	0.26	0.067	0.020
NR/Ag/GO-0.75	0.29	1.47	0.32	0.078	0.022

4.4.2 การวิเคราะห์เชิงความร้อน

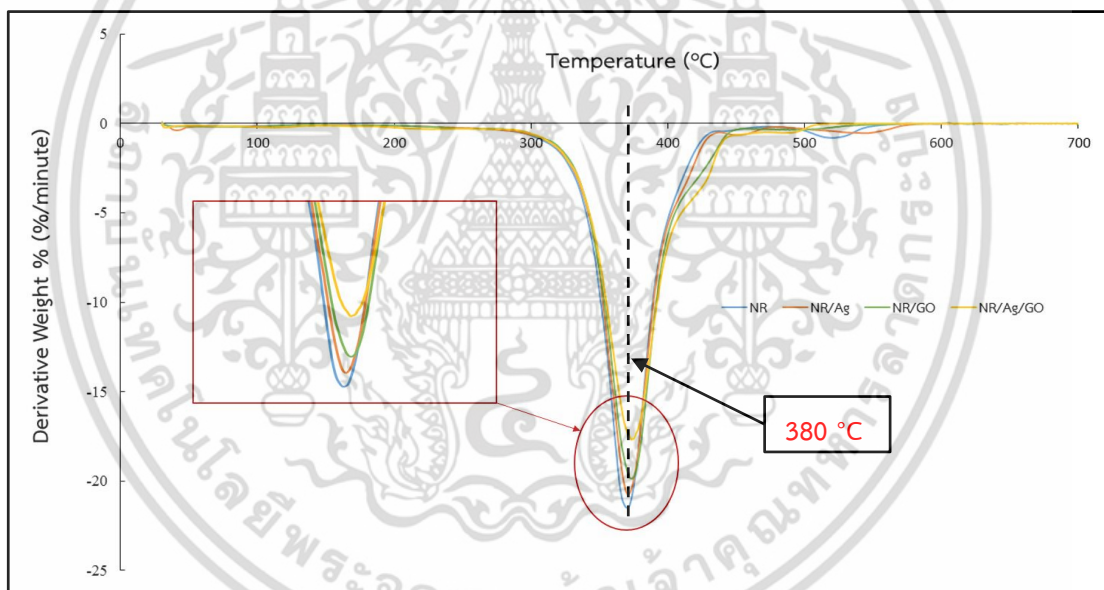
เป็นการใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis ในการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ โดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่ง โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 0 ถึง 800 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยจะทำการวิเคราะห์แผ่นวัสดุผสมเปรียบเทียบกัน 4 ชนิด คือ แผ่นยางธรรมชาติ (NR) แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ตามเงื่อนไข PVP-0.25 (Ag) แผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารการฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (GO) และ แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (AgGO) ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังนี้



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อน (Themogram) ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR)แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ตามเงื่อนไข PVP-0.25 และ แผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.46 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อน พบว่าแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติทั้ง 4 ชนิด เริ่มมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน คือ ที่อุณหภูมิประมาณ 320 °C และจะค่อยๆสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิประมาณ 560 °C และจะสามารถสังเกตเห็นอัตราในการสลายตัวที่แตกต่างกันได้จากค่าความชันของกราฟ โดยพบว่า แผ่นยางธรรมชาติ (NR) จะมีอัตราการสลายตัวทางความร้อนเร็วที่สุด เนื่องจากไม่ได้มีการเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์หรือสารกราฟีนออกไซด์ลงไป และค่าอัตราในการสลายตัวของแผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ตามเงื่อนไข PVP-0.25 (Ag) กับแผ่นยางธรรมชาติที่เติมสารกราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก (GO) จะมีลักษณะใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนและกราฟีนออกไซด์จัดเป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวที่สูง [60] จึงทำให้แผ่นของผสมยางธรรมชาติที่มีสารซิลเวอร์นาโนจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง และจากผลของกราฟ DTG รูปที่ 4.47 จะพบว่าเมื่อผสมทั้งสารซิลเวอร์นาโนและสารกราฟีนออกไซด์ลงไปแผ่นยางธรรมชาติจะทำให้แผ่นของผสมที่เตรียมได้นั้นมีค่าเปอร์เซ็นต์การสลายตัวต่ออนาที (Derivative weight) น้อยที่สุด คือ มีการสลายตัวอยู่ที่ 16 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาทีเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ NR, NR/Ag และ NR/GO ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การสลายตัวอยู่ที่ 22 และ 20 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟการ DTG ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) แผ่นวัสดุผสมจากยางธรรมชาติเติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ตามเงื่อนไข PVP-0.25 และ แผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติ NR/Ag/GO-0.25, NR/Ag/GO-0.50 และ NR/Ag/GO-0.75 ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 การศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และการพิสูจน์เอกลักษณ์

จากการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ โดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นทั้งตัวริวติวซ์และตัวช่วยเพิ่มเสถียรภาพ ซึ่งสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีข้างต้น และค่าความเข้มข้นของสารซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนที่ได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาการสังเคราะห์สารอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ โดยใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นทั้งตัวริวติวซ์และตัวช่วยเพิ่มเสถียรภาพในปริมาณที่แตกต่าง พบว่าเมื่อปริมาณของสารพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่ใช้ในการสังเคราะห์มีมากขึ้นจะทำให้ได้สารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นมากขึ้น และมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากอนุภาคสามารถเกิดการรวมตัวกันได้ ในลักษณะปรากฏการณ์ Oswald ripening

5.1.2 การศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ และการพิสูจน์เอกลักษณ์

จากการศึกษาการเตรียมแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติเติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่าง พบว่าแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติเติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถเตรียมได้จากวิธีการผสมและขึ้นรูปอย่างง่าย ซึ่งจะได้แผ่นของผสมยางธรรมชาติที่มีลักษณะการกระจายตัวได้ดีทั่วทั้งแผ่นอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพ ที่เป็นสารชนิดมีขั้วและไม่มีขั้วจึงทำให้สารอนุภาคนาโนซิลเวอร์กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี ในส่วนของการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีดัดแปลงของฮูมเมอร์ที่สังเคราะห์ได้รวดเร็วและลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ และในส่วนของ การเตรียมแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และกราฟีนออกไซด์ พบว่าได้ลักษณะแผ่นยางที่มีการกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์อย่างสม่ำเสมอ โดยในส่วนของ การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด พบว่าผลการวิเคราะห์จากเทคนิค ATR-FTIR, XRD, และ Raman spectroscopy สามารถพบพิกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารซิลเวอร์อนุภาคนาโน และจากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ของแผ่นของผสมทั้ง 2 ชนิดจะสามารถสังเกตเห็นลักษณะพื้นผิวภายในของแผ่นของผสมที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น และการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถยืนยันได้จากการตรวจวัดธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX ซึ่งจะพบว่ามีสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนกระจายตัวได้ดีในเนื้อยางธรรมชาติ

5.1.3 การศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ

จากการศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เตรียมได้ทั้ง 2 ชนิด พบว่าแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้นเมื่อผสมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นไปในยางธรรมชาติ โดยจะพบว่าแผ่นของผสมยางธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก มากกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมลบ และเมื่อผสมกราฟีนออกไซด์ลงไปแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติจะพบว่าแผ่นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ตีมากขึ้น เนื่องจากกราฟีนออกไซด์สามารถช่วยให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถกระจายตัวอยู่ในเนื้อเยื่ออย่างธรรมชาติได้ดีมากยิ่งขึ้น

5.1.4 การศึกษาสมบัติทางเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของแผ่นของผสมจากยางธรรมชาติ

จากการศึกษาสมบัติทางเชิงกลของแผ่นของผสมยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติในเงื่อนไขต่างๆ พบว่าแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะมีสมบัติทางเชิงกลลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ผสมลงไปเมื่อได้รับความร้อนก็จะสามารถปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออนออกมาทำลายโครงสร้างของเนื้อเยื่อธรรมชาติได้ และเมื่อผสมสารกราฟีนออกไซด์ลงไปแผ่นของผสมยางธรรมชาติพบว่าสมบัติทางเชิงกลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ผสมลงไปปริมาณที่มาก และในส่วนของการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าแผ่นของผสมยางธรรมชาติที่เติมสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์จะมีอัตราการสลายตัวทางความร้อนน้อยกว่าแผ่นของผสมยางธรรมชาติในเงื่อนไขอื่นๆ และมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากทั้งสารอนุภาคซิลเวอร์นาโน และกราฟีนออกไซด์ต่างก็มีส่วนช่วยให้แผ่นของผสมสลายตัวได้ช้า และทนต่ออุณหภูมิได้มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้พบเมื่อทำการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิคทางไมโครเวฟ ควรให้หยุดเวลาในการสังเคราะห์ทุกๆ 15 วินาที เนื่องจากการให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องจะทำให้สารละลายเดือดจนปริมาตรสารในบีกเกอร์ลดลงได้อย่างรวดเร็ว
2. แผ่นยางธรรมชาติเมื่อผสมกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในปริมาณที่มากจะเกิดการเสียสภาพเมื่อทิ้งไว้ 3-5 วัน กล่าวคือ ยางธรรมชาติผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะเปื่อย ทำให้ประสิทธิภาพทางเชิงกลลดลง
3. แผ่นของผสมยางธรรมชาติควรลดปริมาณสารอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไป และเพิ่มปริมาณ GO เพื่อที่จะได้แผ่นของผสมที่มีความแข็งแรงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร. จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์. 2553. “เทคโนโลยียางธรรมชาติ (Natural Rubber Technology).” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [2] A. S. Hashim and S. K. Ong. 2002. “Study on polypropylene/natural rubber blend with polystyrene-modified natural rubber as compatibilizer”. *Polymer International*. 51: 611-616.
- [3] D. T. Thuc , T. Q. Huy , L. H. Hoang , B. C. Tien , P. V. Chung, N. T. Thuy , A. T. Le. 2016. “Green synthesis of colloidal silver nanoparticles through electrochemical method and their antibacterial activity”. *Materials Letters*. 181: 173–177.
- [4] H. Wang, X. Qiao , J. Chen, X. Wang , S. Ding. 2005. “Mechanisms of PVP in the preparation of silver nanoparticles”. *Materials Chemistry and Physics*. 94: 449–453.
- [5] Si. Joseph, B. Mathew. 2014. “Synthesis of Silver Nanoparticles by Microwave irradiation and investigation of their Catalytic activity”. *Research Journal of Recent Sciences*. 3: 185-191.
- [6] L. Bokobza. 2012. “Multiwall carbon nanotube-filled natural rubber: Electrical and mechanical properties”. *Polymer Letters*. 6(3): 213–223.
- [7] S. Salaeh, C. Nakason. 2012. “Influence of Modified Natural Rubber and Structure of Carbon Black on Properties of Natural Rubber Compounds”. *Polymer Composite*. 33 (4):489–500.
- [8] D.C. Stanier, A.J. Patil, C. Sriwong, S.S. Rahatekar, J. Ciambella. 2014. “The reinforcement effect of exfoliated graphene oxide nanoplatelets on the mechanical and viscoelastic properties of natural rubber”. *Composites Science and Technology*. 95: 59–66.
- [9] ©Matador Rubber s.r.o. 2007. “RUBBER CHEMISTRY”. Page 8
- [10] K. Nawamawat, J. T. Sakdapipanich, C. C. HO, Y. Ma, J. Song, J. G. Vancso. 2012. “Surface nanostructure of *Hevea brasiliensis* natural rubber latex particles”. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 390:157-166.
- [11] วีระชัย แสงฉาย. 2554. “สมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [12] H. Ismail and S. M. Nasir. 2001. “Dynamic vulcanization of rubberwood-filled polypropylene/natural rubber blends.” *Polymer Testing*. 20(7): 819-823.
- [13] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/เงิน>
- [14] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: <http://www.sigmaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/nanomaterials/silver-nanoparticle.html>
- [15] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: <https://nanocomposix.com/collections/bimetallic>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: <https://www.newscientist.com/article/dn18518-coloured-lights-sculpt-nanoparticles/>.
- [17] S. Iravani, H. Korbekandi, S. V. Mirmohammadi, B. Zolfaghari. 2014. "Synthesis of silver nanoparticles: chemical physical and biological methods". *Research in Pharmaceutical Sciences*. 9(6): 385-406.
- [18] J. H. Jung, H. C. Oh, H. S. Noh, J. H. Jib, S. S. Kima. 2006. "Metal nanoparticle generation using a small ceramic heater with a local heating area". *Aerosol Science* 37: 1662–1670.
- [19] F. Mafune, J. Kohno, Y. Takeda, T. Kondow. 2000. "Structure and Stability of Silver Nanoparticles in Aqueous Solution Produced by Laser Ablation". *The Journal of Physical Chemistry B*, 104(35): 2000.
- [20] H. Wang, X. Qiao, J. Chen, S. Ding. 2005. "Preparation of silver nanoparticles by chemical reduction method". *Colloids and Surfaces*. 256:111–115.
- [21] Y. Zhou, S. H. Yu, C. Y. Wang, X. G. Li, Y. R. Zhu, Z. Y. Chen. 1999. "A Novel Ultraviolet Irradiation Photoreduction Technique for the Preparation of Single-Crystal Ag Nanorods and Ag Dendrites". *Advanced Materials*. 11: 10.
- [22] M. Maillard, P. Huang, L. Brus. 2003. "Silver Nanodisk Growth by Surface Plasmon Enhanced Photoreduction of Adsorbed $[Ag^+]$ ". *NANO LETTER*. 3(11): 1611-1615.
- [23] A. Panacek, L. K. tek, R. Prucek, M. Kola , R. Vecerova, N. Pizurova, V. K. Sharma, T. Nevecna , R. Zboril. 2006. "Silver Colloid Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Their Antibacterial Activity". *The Journal of Physical Chemistry B*. 110:16248-16253.
- [24] J.Chen , J. Wang, X. Zhang, Y. Jin. 2008. "Microwave-assisted green synthesis of silver nanoparticles by carboxymethyl cellulose sodium and silver nitrate". *Materials Chemistry and Physics*. 108: 421–424.
- [25] K. Kalishwaralal, V. Deepak, S. Ramkumarpandian, H. Nellaiah, G. Sangiliyandi. 2008. "Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles by the culture supernatant of *Bacillus licheniformis*". *Materials Letters* .62: 4411–4413.
- [26] Alfredo R. V. Nestor, V. Sánchez-Mendieta , Marco A. C. López ,Rosa M. G. Espinosa, Miguel A. C. López , Jesús A, A. Alatorre. 2008. "Solventless synthesis and optical properties of Au and Ag nanoparticles using *Camellia sinensis* extract". *Materials Letters*. 62: 3103–3105.
- [27] Chaloupka et al., *Trends in Biotechnology*, 2010.
- [28] N. M. Nadagouda, T. F. Speth, R. S. Varma. 2011. "Microwave-Assisted Green Synthesis of Silver Nanostructures". *Accounts of chemical research*. 44(7): 469–478.
- [29] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=kp33Zpr00Ck>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] O. Oluwafemi, T. Mochochoko, A. Leo, S. Mohan, D. N. Jumbam, S. P. Songca. 2016. "Microwave irradiation synthesis of silver nanoparticles using cellulose from Eichhorniacrassipes plant shoot". *Materials Letters*. 185: 576–579.
- [31] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polyvinylpyrrolidon.svg>
- [32] Retrieved March 21, 2016. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinylpyrrolidone>.
- [33] Ashland. 2005. "PVP Polyvinylpyrrolidone polymers".
- [34] S. Lien-Chung Hsu, R. T. Wu. 2011. "Preparation of Silver Nanoparticle with Different Particle Sizes for Low Temperature Sintering". *IPCBE*. 2.
- [35] D. Malina, A. S. Kupiec, Z. Wzorek, Z. Kowalski. 2012. "Silver nanoparticles synthesis with different concentrations of polyvinylpyrrolidone". *Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 7(4):1527-1534.
- [36] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: http://thep-center.org/src/qa_read.php?question_id=2.
- [37] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: https://www.google.co.th/search?q=graphene+oxide+synthesis&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjDu aOisfDUAhXLq48KHZzoHAw0Q_AUIBigB&biw=1920&bih=974#imgrc=wQPasxN46M PhCM;
- [38] S. N. Alam, N. Sharma, L. Kumar. 2017. "Synthesis of Graphene Oxide (GO) by Modified Hummers Method and Its Thermal Reduction to Obtain Reduced Graphene Oxide (rGO)". *Graphene*, 6:1-18.
- [39] X. She, C. He, Z. Peng, L. Kong. 2014. "Molecular-level dispersion of graphene into epoxidized natural rubber: Morphology, interfacial interaction and mechanical Reinforcement". *Polymer*. 55: 6803-6810.
- [40] ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ. 2554. "การพัฒนาวัสดุอย่างธรรมชาติ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย สำหรับการประยุกต์ใช้งานในผลิตภัณฑ์ด้านอนามัย." รายงานวิจัย คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [41] Retrieved March 21, 2016. [Online]. Available: <http://www.studydroid.com/imageCards/0m/h8/card-23634316-front.jpg>
- [42] S. M. Dizaj, F. Lotfipour, M. Barzegar-Jalali, M. H. Zarrintan, K. Adibkia. 2014. "Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles". *Materials Science and Engineering*. C 44: 278–284.
- [43] H. Palza. 2015. "Antimicrobial Polymers with Metal Nanoparticles." *International Journal of Molecular Sciences*. 16(1) : 2099-2116.
- [44] P. Krystosiak, W. Tomaszewski, E. Megiel. 2017. "High-density polystyrene-grafted silver nanoparticles and their use in the preparation of nanocomposites with antibacterial properties". *Journal of Colloid and Interface Science*. 498: 9–21.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [45] Y. H. Joe, W. Ju, J. H. Park, Y. H. Yoon and J. Hwang. 2013. “Correlation between the Antibacterial Ability of Silver Nanoparticle Coated Air Filters and the Dust Loading.” *Aerosol and Air Quality Researcher*. 13: 1009-1018.
- [46] C. Díaz-Cruz, G. A. Nuñez, H. Espinoza-Gómez, L. Z. Flores-López, 2016. “Effect of molecular weight of PEG or PVA as reducing-stabilizing agent in the green synthesis of silver-nanoparticles”. *European Polymer Journal* 83: 265–277.
- [47] 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.
- [48] K. B. Narayanan, S. S. Han. 2017. “Dual-crosslinked poly (vinyl alcohol)/sodium alginate/silver nanocomposite beads – A promising antimicrobial material”. *Food Chemistry* 234:103–110.
- [49] M. Darroudi, M. B. Ahmad, A. K. Zak, R. Zamiri, M. Hakimi. 2011. “Fabrication and Characterization of Gelatin Stabilized Silver Nanoparticles under UV-Light”. *International Journal of Molecular Sciences*. 12:6346-6356.
- [50] N. T. K. Thanh, N. Maclean, S. Mahiddine. 2014. “Mechanism of nucleation and growth of nanoparticles in solution”. *Chemical Reviews*. 114:7610-7630.
- [51] S. Agnihotri, S. Mukherji, S. Mukherji. 2014. “Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5-100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy”. *RSC Advances*. 4:3974-3983.
- [52] K. Jyoti, M. Baunthiyal, A. Singh. 2016. “Characterization of silver nanoparticles synthesized using *Urtica dioica* Linn. Leaves and their synergistic effects with antibiotics”. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 9: 217-227.
- [53] Retrieved March 20, 2016. [Online]. Available: oft-matter.seas.harvard.edu/index.php/File:Overview.jpg
- [54] X. Zhang, J. Wang, H. Jia, S. You, X. Xiong, L. Ding, Z. Xu. 2016. “Multifunctional nanocomposites between natural rubber and polyvinyl pyrrolidone modified graphene”. *Composites Part B*. 84:121-129.
- [55] X. Zhang, J. Wang, H. Jia, B. Yin, L. Ding, Z. Xu, Q. Ji. 2016. “Polyvinyl pyrrolidone modified graphene oxide for improving the mechanical, thermal conductivity and solvent resistance properties of natural rubber”. *RSC Advances*. 6:54668-54678.
- [56] T. Rattana, S. Chaiyakun,, N. Witit-anun,, N. Nuntawong, P. Chindaudom, S. Oaew , C. Kedkeaw, P. Limsuwan. 2012. “Preparation and characterization of graphene oxide nanosheets”. *Procedia Engineering* 32: 759 – 764.

- [57] L. Stobinski, B. Lesiak, A. Malolepszy, M. Mazurkiewicz, B. Mierzwa, J. Zemek, P. Jiricek, I. Bieloshapka. 2014. "Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods". *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 195: 145–154.
- [58] O. S. N. Ghosh, S. Gayathri, P. Sudhakara, S.K. Misra, J. Jayaramudu. 2017. "Natural Rubber Nanoblends: Preparation, Characterization and Applications". *Springer Series on Polymer and Composite Materials*. 15-65.
- [59] K. Jyoti, M. Baunthiyal, A. Singh. 2016. "Characterization of silver nanoparticles synthesized using *Urtica dioica* Linn. leaves and their synergistic effects with antibiotics". *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 9: 217-227.
- [60] M. A. M. Khan, S. Kumar, M. Ahamed, S. Alrokayan, M. S. AlSalhi. 2011. "Structural and thermal studies of silver nanoparticles and electrical transport study of their thin films". *Nanoscale Research Letters*. 6:434.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

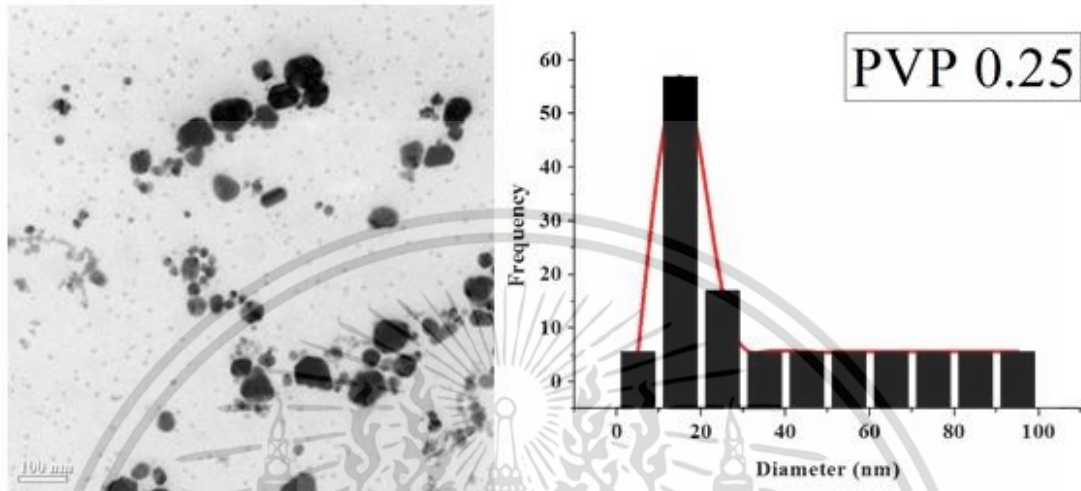


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

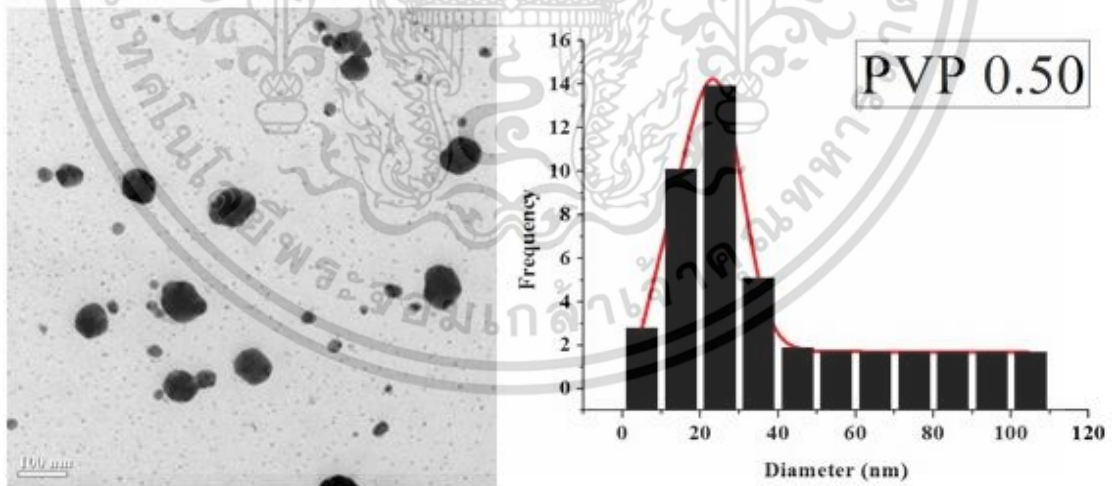


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์เอกลักษณ์
ผลการวิเคราะห์Transmission electron microscope และเทคนิค SAED

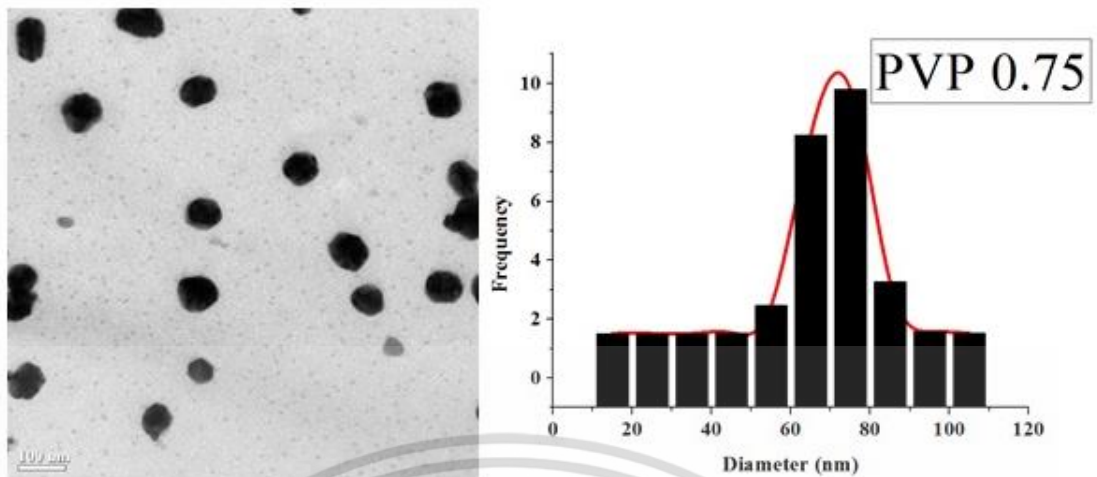


รูปที่ 1 ภาพจากกล้อง Transmission electron microscope ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข PVP-0.25

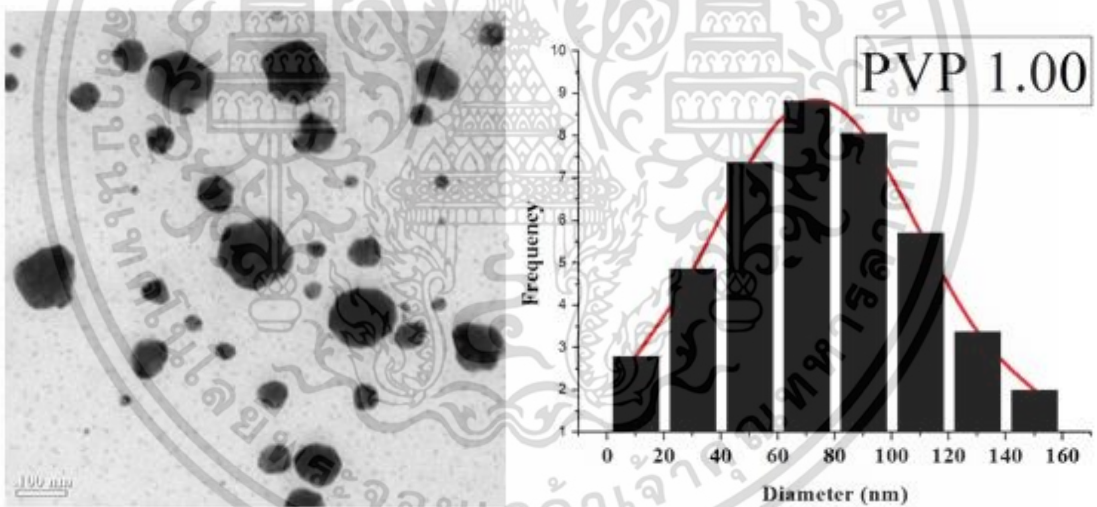


รูปที่ 2 ภาพจากกล้อง Transmission electron microscope ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข PVP-0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

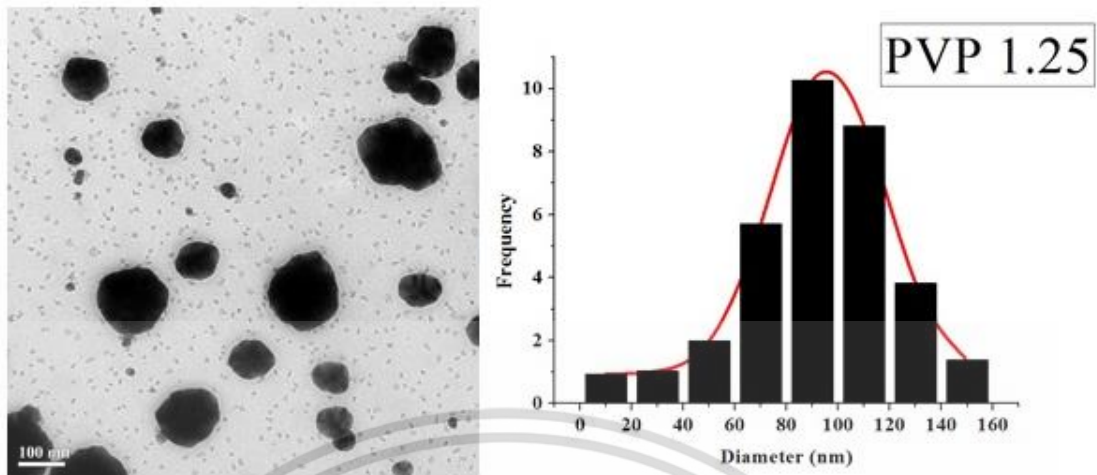


รูปที่ 3 ภาพจากกล้อง Transmission electron microscope ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข PVP-0.75

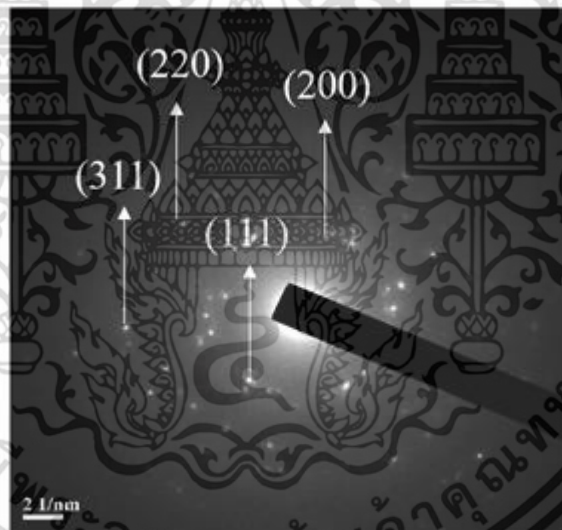


รูปที่ 4 ภาพจากกล้อง Transmission electron microscope ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข PVP-0.1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 ภาพจากกล้อง Transmission electron microscope ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข PVP-0.1.25



รูปที่ 6 ภาพจากเทคนิค SAED แสดงวงแหวนผลึกของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวรท ประสานเสียง
วัน เดือน ปีเกิด	2 ธันวาคม พ.ศ. 2534
ที่อยู่	50/645 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรตเฉลี่ย 2.77 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2559 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี(เคมีอินทรีย์) เกรตเฉลี่ย 3.75 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. [Poster Presentation] 2016. “Effect of Synthesized Ag Nanoparticles by Using the Different Amounts of Polyvinylpyrrolidone for Ag-Natural Rubber Hybrid Sheets and their Antibacterial Properties” at “9 th International Conference on Materials Science and Technology; MSAT-9”. Swissotel Le Concorde Bangkok Thailand. 2. [Publications] W. Prasanseang, C. Sriwong, K. Choojun. “Effect of Synthesized Ag Nanoparticles by Using the Different Amounts of Polyvinylpyrrolidone for Ag-Natural Rubber Hybrid Sheets and their Antibacterial Properties”. 2017. Key Engineering Materials. 751: 270 – 276.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้