

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติการยับยั้ง
เชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสม
อนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND ANTIBACTERIAL
PROPERTIES OF NATURAL RUBBER-SILVER
NANOPARTICLES COMPOSITE SHEETS

ปรัชญา	มาสุข
วนิดา	เกาะม่วง
วรรณภา	วุฒิสัย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติการยับยั้ง
เชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสม
อนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND ANTIBACTERIAL
PROPERTIES OF NATURAL RUBBER-SILVER
NANOPARTICLES COMPOSITE SHEETS



ปรัชญา	มาสุข
วนิดา	เกาะม่วง
วรรณภา	วุฒิสไ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **149316**
ร.น. เดือน ปี... **12 ก.พ. 2561**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

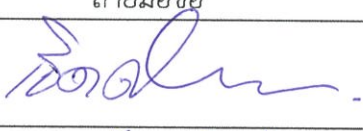

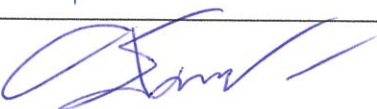
PREPARATION, CHARACTERIZATION AND ANTIBACTERIAL
PROPERTIES OF NATURAL RUBBER-SILVER
NANOPARTICLES COMPOSITE SHEETS

PRACHAYA	MASUK
WANIDA	KORMUANG
WANNAPHA	WUTTISO

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของ แผ่นยางธรรมชาติผสมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร Preparation, Characterization and Antibacterial Properties of Natural Rubber-Silver Nanoparticles Composite Sheets
ชื่อนักศึกษา	นายปรัชญา มาสุข รหัสนักศึกษา 55050722 นางสาวนิตดา เกษะม่วง รหัสนักศึกษา 55050792 นางสาววรรณภา วุฒิโส รหัสนักศึกษา 55050794
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์ ประธานกรรมการ	
ดร. การุณย์ สาดอ่อน กรรมการ	
ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
ชื่อนักศึกษา	ของแผ่นยางธรรมชาติผสมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร นายปรัชญา มาสุข รหัสนักศึกษา 55050722 นางสาววนิดา เกาะม่วง รหัสนักศึกษา 55050792 นางสาววรรณภา วุฒิสัย รหัสนักศึกษา 55050794
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของของโครงการพิเศษนี้ก็คือการศึกษาการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร รวมไปถึงการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลด้วย โดยทำการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีการไมโครเวฟขึ้นก่อน แล้วนำสารแขวนลอยซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณต่างๆ มาเติมลงในน้ำยางธรรมชาติ (60%HA) เพื่อเตรียมเป็นแผ่นยางธรรมชาติผสมซิลเวอร์นาโนโดยใช้กระบวนการปั่นผสมแบบลาเท็กซ์อย่างง่าย จากนั้นขึ้นรูปในแม่แบบแล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ถูกตรวจพิสูจน์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visble) แล้ววิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ส่วนแผ่นยางธรรมชาติผสมซิลเวอร์นาโนนั้นจะถูกนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิครังสีอินฟราเรด (FT-IR) การวิเคราะห์พื้นผิวระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การหาชนิด ปริมาณและการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS) และการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (TGA) จากผลการตรวจวิเคราะห์พบว่าซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 23.51 ± 5.00 nm และมีรูปร่างคล้ายทรงกลม ส่วนผลจากเทคนิค SEM และ EDS พบว่าเมื่อเติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนลงไปปริมาณที่มากขึ้น จะมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนฝังตัวอยู่ในเนื้อแผ่นยางในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางผสมซิลเวอร์นาโนโดยทดสอบกับแบคทีเรียแกรมบวกคือ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบคือ *Escherichia* (*E. coli*) ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้นั้นสามารถยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ดี และความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจะสูงขึ้นเมื่อเติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนลงในยางธรรมชาติมากขึ้น

คำสำคัญ : กระบวนการปั่นผสมแบบลาเท็กซ์, น้ำยางธรรมชาติ, แผ่นยางธรรมชาติผสม, อนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร,

Title	Preparation, Characterization and Antibacterial Properties of Natural Rubber-Silver Nanoparticles Composite Sheets	
Students	Mr. Prachaya Masuk	Student ID 55050722
	Miss Wanida Kormuang	Student ID 55050792
	Miss Wannapha Wuttiso	Student ID 55050794
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2015	
Advisor	Dr. Chaval Sriwong	

Abstract

The objective of this special project is to study the preparation, characterization and antibacterial properties of natural rubber-silver nanoparticles composite sheets, including the thermal and mechanical properties were also investigated. In the preparation, the colloidal silver nanoparticles were firstly synthesized by using a microwave assisted method, whereas the composite sheets were prepared by a simply latex mixing method of natural rubber latex (60% HA) with the varying amounts of colloidal silver nanoparticles, then casting into a mold, and drying at room temperature. The particles size and shape of silver nanoparticles were examined through UV-vis spectroscopy and transmission electron microscopy (TEM) techniques. The as-prepared composite sheets were characterized by using X-ray diffraction (XRD), Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectrometer (EDS) and Thermogravimetric analysis (TGA). It was found that the average particles size of nano-silver was about 23.51 ± 5.00 nm and had spherical-like shape. From the SEM and EDS results, the morphologies of the composite sheets were increased by impregnating silver nanoparticles on the matrix of natural rubber when the increasing amount of nano-silver loading. Moreover, the antibacterial properties of these composite sheets were also test against Gram-Positive *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) and Gram-Negative *Escherichia coli* (*E. coli*). The results showed that the rubber composite sheets could be inhibited the growth of these bacterial in a vary strong manner which the antibacterial activities of these composite sheets were increased with increasing amount of nano-silver loading.

Keywords : Latex mixing method, Natural rubber latex, Natural rubber composite, Silver nanoparticles,

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบพระคุณกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ดร. เชิดศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์ และดร. การุณย์ สาดอ่อน ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ปรัชญา มาสุข

วนิดา เกาะม่วง

วรรณภา วุฒิโส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR).....	4
2.2 สารเคมีที่ใช้ในยาง.....	5
2.3 วัสดุเชิงประกอบ (Composite material)	6
2.3.1 การจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์.....	6
2.3.2 วัสดุผสมระดับนาโน (Nano composite)	9
2.4 ธาตุเงินอนุภาคระดับนาโนเมตรหรือซิลเวอร์นาโน.....	9
2.4.1 สมบัติเชิงแสง.....	10
2.4.2 สมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	12
2.4.3 กลไกในการเกิดซิลเวอร์นาโน	13
2.5 พอลิไวนิลไพโรลิโดน Polyvinylpyrrolidone (PVP).....	13
2.6 แบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษา.....	14
2.6.1 <i>Staphylococcus aureus</i>	15
2.6.2 <i>Escherichia coli</i>	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.7.1 Preparation of PVA Stabilized Silver Nanoparticles by Gamma Irradiation	17
2.7.2 Preparation and characterization of gelatin mediated silver nanoparticles by laser ablation.....	18
2.7.3 Synthesis of powdered silver nanoparticles using hydrogen in aqueous medium	19
2.7.4 Synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction method and their antibacterial activity	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.5 Synthesis of Silver Nanoparticles by using Sodium Borohydride as a Reducing Agent	21
2.7.6 Green Formation of Spherical and Dendritic Silver Nanostructures under Microwave Irradiation without Reducing Agent.....	22
2.7.7 Enhancement of the Antibacterial Activity of Natural Rubber Latex Foam by the Incorporation of Zinc Oxide Nanoparticles..	25
2.7.8 Microwave assisted antibacterial chitosan–silver nanocomposite films.....	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	27
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	27
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	27
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.4.1 การเตรียม Stock solution ของสารละลายซิลเวอร์ผสม PVP	28
3.4.2 การสังเคราะห์สารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยวิธีไมโครเวฟ.....	28
3.4.3 การคำนวณน้ำหนักของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ใช้ในหน่วย mg/mL	29
3.4.4 การเตรียมคอมโพสิตของแผ่นยางธรรมชาติ	29
3.4.5 การศึกษาด้วยเทคนิค UV–Visible Spectroscopy	30
3.4.6 การศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope (TEM)	30
3.4.7 การศึกษาด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy	30
3.4.8 การศึกษาด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).....	31
3.4.9 การศึกษาด้วยเทคนิค X-ray diffraction analysis (XRD).....	31
3.4.10 การศึกษาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)	31
3.4.11 การศึกษาด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX)	31
3.4.12 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTG.....	31
3.4.13 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิค UTM	31
3.4.14 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	33
4.1 ผลการการสังเคราะห์สารแขวนลอยของอนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตร.....	33
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิค UV–Visible Spectroscopy	34
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope (TEM)	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติและคอมโพสิตระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร.....	38
4.2.1 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางคอมโพสิตด้วยเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy	40
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction analysis (XRD)	42
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy	43
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive X-ray (EDX) spectroscopy	44
4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTG	48
4.2.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิต .	49
4.2.7 ผลการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59
ประวัติผู้วิจัย.....	63

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สัดส่วนการเตรียมคอมโพสิตของแผ่นยางธรรมชาติ	30
4.1 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นของสารแขวนลอยซิลเวอร์ที่สังเคราะห์โดย ฉายคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์	36
4.2 การคำนวณน้ำหนักของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ใช้ในหน่วย mg/mL.....	39
4.3 ค่าการสั้นของหมู่ฟังก์ชันในแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างน้ำยางธรรมชาติ ผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร	41
4.4 Mapping ของธาตุที่พบบนแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่าง น้ำยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาตร 0.50 (B3) และ 2.00 mL (B5) ที่ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX.....	45
4.5 ตารางแสดงการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบในแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอม โพสิต.....	47
4.6 ค่าสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาค ระดับนาโนเมตร	51
4.7 ขนาดของ clear zone ของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อทดสอบด้วยเชื้อ <i>S. aureus</i> และเชื้อ <i>E. coli</i> (<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923, <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922).....	55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
2.3	6
2.4	7
2.5	8
2.6	8
2.7	10
2.8	11
2.9	11
2.10	12
2.11	13
2.12	14
2.13	14
2.14	15
2.15	16
2.16	17
2.17	18
2.18	19
2.19	20
2.20	21
2.21	22
2.22	23
2.23	23
2.24	24
2.25	24
2.26	25
2.27	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 การสังเคราะห์ฟิล์มนาโนคอมโพสิตระหว่างไคโตซานผสมกับซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร และผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	26
4.1 ลักษณะของสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร เมื่อใช้ระยะเวลาในการฉายรังสี ไมโครเวฟ 0 90 120 150 และ 180 วินาทีตามลำดับ.....	33
4.2 สเปกตรัม UV-visible ของสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อฉายคลื่น ไมโครเวฟที่กำลัง 100 300 และ 450 วัตต์ เป็นเวลา 120 วินาทีตามลำดับ.....	35
4.3 สเปกตรัม UV-Visible ของ PVP และสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อฉาย คลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์เป็นเวลา 0 30 60 90 120 150 และ 180 วินาทีตามลำดับ	35
4.4 สเปกตรัม UV-Visible ของสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อฉายคลื่น ไมโครเวฟกำลัง 300 วัตต์ เป็นเวลา 120 วินาที และเก็บสารไว้เป็นเวลา 6 เดือน.....	37
4.5 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลเวอร์ที่ได้จากสังเคราะห์โดยใช้ PVP เป็นสารรักษาสภาพ.....	37
4.6 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตร.....	38
4.7 ลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางคอมโพสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาค ระดับนาโนเมตร (B3).....	39
4.8 ลักษณะของแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับ นาโนเมตรที่ปริมาณต่างๆ.....	40
4.9 สเปกตรัม FTIR ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสาร แขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรที่ปริมาณต่างๆ	41
4.10 สเปกตรัม XRD Pattern ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่าง ยางธรรมชาติผสมซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ (B2 B3 B4 และB5).....	42
4.11 สเปกตรัม Raman ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติ ผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน (B3 และ B5).....	43
4.12 ลักษณะ (cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยาง คอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ (B3 และ B5) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM.....	44
4.13 สเปกตรัมธาตุที่พบบนแผ่นยางธรรมชาติ (B1) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX.....	46
4.14 สเปกตรัมธาตุที่พบบนแผ่นยางคอมโพสิตเมื่อเติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน 0.50 mL (B3) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX.....	46
4.15 สเปกตรัมธาตุที่พบบนแผ่นยางคอมโพสิตเมื่อเติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน 2.00 mL (B5) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX.....	47
4.16 กราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางคอม โปสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณปริมาณต่างๆที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 กราฟ Derivative Thermo Gravimetric (DTG) ของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางคอมพอสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณปริมาณต่างๆ	48
4.18 กราฟแสดงค่าค่า Stress และ Percentage Strain ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมพอสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ	50
4.19 กราฟแสดงค่า Young's Modulus ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมพอสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ.....	50
4.20 กราฟแสดงค่า % Elongation at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมพอสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ	51
4.21 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ <i>S. aureus</i> ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) 1.00 mL (B4) 2.00 mL (B5) และแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6)	52
4.22 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i> ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) 1.00 mL (B4) 2.00 mL (B5) และแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6).....	53
4.23 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ <i>S. aureus</i> ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) แผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6) และแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลาย PVP (B7).....	54
4.24 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i> ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) แผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6) และแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลาย PVP (B7).....	54
4.25 กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน	56

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
B1	ตัวอย่างแผ่นยางธรรมชาติ
B2	ตัวอย่างแผ่นยางคอมพโพลีเอสเตอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.10 mL
B3	ตัวอย่างแผ่นยางคอมพโพลีเอสเตอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL
B4	ตัวอย่างแผ่นยางคอมพโพลีเอสเตอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับซิลเวอร์นาโนปริมาณ 1.00 mL
B5	ตัวอย่างแผ่นยางคอมพโพลีเอสเตอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับซิลเวอร์นาโนปริมาณ 2.00 mL
B6	ตัวอย่างแผ่นยางคอมพโพลีเอสเตอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท
B7	ตัวอย่างแผ่นยางคอมพโพลีเอสเตอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับสารละลาย PVP
PVP	พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันยางธรรมชาติ (Natural rubber) ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ยานพาหนะ ถุงมือทางการแพทย์ รองเท้าและอุปกรณ์กีฬา แผ่นปูพื้น เป็นต้น ทั้งนี้ เนื่องจากยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี มีความต้านทานการขูดถู ป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ดี มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าและมีความทนต่อแรงดึงสูงมาก [1] อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้ใช้งานได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ จึงได้มีการศึกษาวิจัยการเพิ่มสมบัติให้แกยางธรรมชาติโดยทำให้เป็นวัสดุประกอบ (Composite material) ซึ่งได้มีงานวิจัยหลายงานเกี่ยวกับวัสดุประกอบเชิงพอลิเมอร์ เช่น การเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโพลีผสมเส้นใยปอ [2] วัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วย [3] การทำวัสดุผสมของโพลีไวนิลคลอไรด์กับผงซีลีเนียมเพื่อเสริมสมบัติเชิงกล [4] เป็นต้น

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่นิยมนำไปใช้ในชีวิตประจำวันหลายอย่างเช่น ใช้เป็นอุปกรณ์ในทางการแพทย์ บรรจุกฎภัณฑ์อาหาร รวมถึงอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ซึ่งการนำผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติไปใช้นั้นมีโอกาสที่จะต้องปนเปื้อนแบคทีเรียหรือเชื้อราจากสิ่งแวดล้อมทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่น่าใช้และเกิดการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติขึ้น เนื่องจากในน้ำยางธรรมชาติมีสารจำพวกโปรตีนและฟอสโฟลิปิดผสมอยู่ ดังนั้นการจะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจึงเป็นสมบัติหนึ่งที่น่าสนใจ โดยส่วนใหญ่จะนิยมทำเป็นวัสดุประกอบโดยเติมสารจำพวกสารยับยั้งแบคทีเรีย (Antibacterial agents) เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ ซิงก์ออกไซด์ และซิลเวอร์ เป็นต้น [5] จากการศึกษาจะเลือกใช้ซิลเวอร์ เนื่องจากเป็นที่นิยมมาตั้งแต่ยุคโบราณและใช้ในงานเชิงวัสดุหลากหลายประเภท การใช้งานซิลเวอร์จะใช้งานในรูปของอนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตร ซึ่งเมื่อมีขนาดอนุภาคเล็กลงในระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวมากทำให้มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี

อนุภาคซิลเวอร์เป็นหัวข้อวิจัยที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องด้วยประโยชน์ของซิลเวอร์นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายโดยเฉพาะทางด้านการมีฤทธิ์ยับยั้งหรือฆ่าเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา จากการศึกษาค้นคว้าในอดีตพบว่า ซิลเวอร์หรือโลหะเงินสามารถขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เผาผลาญออกซิเจนและพลังงานของเชื้อแบคทีเรียได้ จึงทำให้เชื้อแบคทีเรียขาดอาหารและตายในที่สุด จากความก้าวหน้าของการวิจัยได้ทำให้พบว่าถ้าทำให้อนุภาคของเงิน (Silver nanoparticles) มีขนาดเล็กมากๆ จนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ของแบคทีเรียแล้วออกฤทธิ์ทำลายเซลล์ของแบคทีเรียได้แม้ใช้ปริมาณของซิลเวอร์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงเริ่มมีการนำซิลเวอร์มาประยุกต์ใช้ผสมในวัสดุต่างๆ มากขึ้น

ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ให้มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นวิธีที่ต้องใช้สารเคมีเป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอีกทั้งในบางวิธีนั้นต้องใช้เครื่องมือขั้นสูงและใช้เวลานานในการสังเคราะห์ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเช่น กระบวนการรีดักชันทางเคมีโดยใช้ Sodium borohydride (NaBH_4) [6] หรือ Hydrazine hydrate [7] เป็นตัวรีดิวซ์ วิธีเฟลอมสเปรย์ไพโรลิซิส [8] และกระบวนการทางพลาสมา [9] เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการทดลองวิธีที่ไม่ใช้สารเคมีเป็นตัวการรีดิวซ์ โดยจะใช้คลื่นไมโครเวฟและใช้สาร Polyvinylpyrrolidone (PVP) เพื่อเป็นตัวรักษาเสถียรภาพของอนุภาค ซึ่งจะช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคทำให้สามารถเก็บรักษาสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรได้เป็นระยะเวลาานาน [10]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตรโดยใช้ PVP เป็นสารรักษาสภาพและนำสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคขนาดระดับนาโนเมตรไปใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของแผ่นยางธรรมชาติให้มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยการเตรียมเป็นวัสดุประกอบด้วยสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคขนาดระดับนาโนเมตร และใช้วิธีการผสมโดยตรงกับน้ำยางธรรมชาติ (Latex mixing method) แล้วเทขึ้นรูปตากไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ก็จะได้เป็นแผ่นยางธรรมชาติผสมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร จากนั้นนำไปศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยตูบไมโครเวฟ โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) เป็นตัวเริ่มต้นและใช้สารละลาย PVP เป็นสารรักษาสภาพ
- 2) เพื่อศึกษาผลของเวลาและผลของกำลังในการฉายรังสีไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างๆ เพื่อใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร
- 3) เพื่อศึกษาเอกลักษณ์ของซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิค UV-visible spectroscopy และ TEM
- 4) เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร โดยศึกษาผลของปริมาณของซิลเวอร์ที่เติมลงไป
- 5) เพื่อศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิค XRD FTIR Raman SEM และ EDX ตามลำดับ
- 6) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร ที่เตรียมด้วยตูบไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 300 วัตต์ โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) เป็นตัวเริ่มต้นและใช้สารละลาย PVP เป็นสารรักษาสภาพแล้วฉายรังสีไมโครเวฟเป็นเวลา 120 วินาที
- 2) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดอนุภาคซิลเวอร์ เช่น ผลของเวลาได้แก่ช่วงเวลา 30 60 90 120 150 และ 180 วินาทีตามลำดับ และผลของกำลังในการฉายรังสีไมโครเวฟที่กำลัง 100 300 และ 450 วัตต์
- 3) ศึกษาเอกลักษณ์ของสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค UV-visible spectroscopy และ TEM
- 4) ศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของแผ่นยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร (29.10 mg/mL) โดยใช้สารแขวนลอยซิลเวอร์ปริมาตร 0.10 0.50 1.00 และ 2.00 mL ตามลำดับ
- 5) ศึกษาเอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิค XRD FTIR Raman SEM และ EDX ตามลำดับ
- 6) ศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดได้แก่ เชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* (*E. coli*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

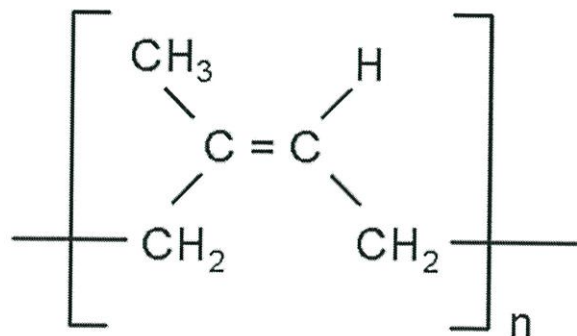
- 1) มีความรู้ ความเข้าใจ และสามารถเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยตูบไมโครเวฟ โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) เป็นตัวเริ่มต้นและใช้สารละลาย PVP เป็นสารรักษาสภาพได้
- 2) มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร
- 3) สามารถเตรียมแผ่นยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรได้และทราบถึงผลของปริมาณซิลเวอร์ที่มีต่อแผ่นยางธรรมชาติ
- 4) มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร
- 5) ได้แผ่นยางธรรมชาติที่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้
- 6) อาจเป็นการเพิ่มความหลากหลายในการนำยางธรรมชาติมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ ซึ่งอาจจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติได้อีกทางหนึ่ง เนื่องจากปัจจุบันยางธรรมชาติมีราคาถูกลง

บทที่ 2

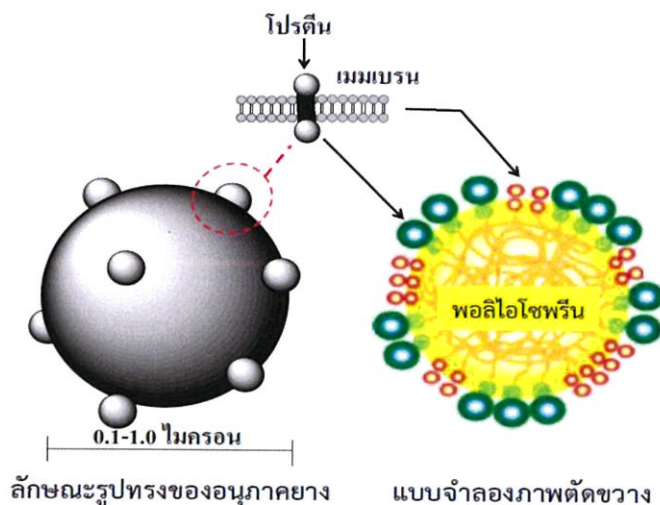
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อเยื่อแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) น้ำยางสดหลังกรีดจากต้นคงสภาพน้ำยางอยู่ได้เพียงระยะเวลาสั้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ผิวของอนุภาคยางและการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแบคทีเรียที่ใช้อาหารในน้ำยาง ทำให้อนุภาคยางรวมตัวกันเป็นก้อนบูดเน่ามีกลิ่นเหม็น การผลิตน้ำยางข้นจึงต้องใช้สารรักษาสภาพทั้งในส่วนของน้ำยางสดก่อนการแปรรูปและน้ำยางข้นหลังการแปรรูป สารเคมีที่ใช้ในการรักษาสภาพน้ำยางคือ สารละลายแอมโมเนีย ซึ่งการเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น ยางธรรมชาติเป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นหลายประการเช่น มีสมบัติเชิงกลดี มีความยืดหยุ่น (elastic) สูง มีความเหนียว (toughness) มีความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง และสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดีเช่น โลหะ สิ่งทอ ฯลฯ จึงสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้หลากหลายมากขึ้น ชื่อทางเคมีของยางธรรมชาติคือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene (C_5H_8) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000 ถึง 20,000 [12] เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น สูตรโครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.1 และแบบจำลองอนุภาคของยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ [13]



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ [12]



รูปที่ 2.2 แบบจำลองอนุภาคของยางธรรมชาติ [11]

2.2 สารเคมีที่ใช้ในยาง

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึงสารเคมีต่างๆที่ผสมลงไปในยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วไม่อาจนำไปใช้งานได้เว้นแต่สารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับยางก่อนซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanised rubber หรือ Cured rubber)

2.2.1 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ

เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่ป้องกันออกซิเจน (O_2) ในอากาศที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมสภาพจึงมีผลทำให้ช่วยยืดอายุการใช้งานได้แก่ สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) หรือสารต้านทานปฏิกิริยาโอโซน (Antiozonant) โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มอนุพันธ์เอมีน กลุ่มอนุพันธ์ฟีนอล และกลุ่มอิมิดาซอล

2.2.2 สารที่ช่วยเพิ่มความเสถียร

เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่รักษาความเป็นเบสของน้ำยาง เพื่อไม่ให้น้ำยางเสียสภาพ ดังนั้นสารที่ช่วยเพิ่มความเสถียรจึงควรเป็นสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ที่นิยมใช้คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือที่อยู่ในรูปของสบู่กรดไขมัน เช่น โพแทสเซียมคลอเรต โพแทสเซียมโอเลเอต แอมโมเนียมคลอเรต และแอมโมเนียมคาซิเนต โดยเฉพาะกลุ่มพวกแอมโมเนียมซึ่งมีกลิ่นที่ฉุนมากดังนั้นควรใส่อย่างพอดีและระมัดระวัง

2.2.3 สารวัลคาไนซ์

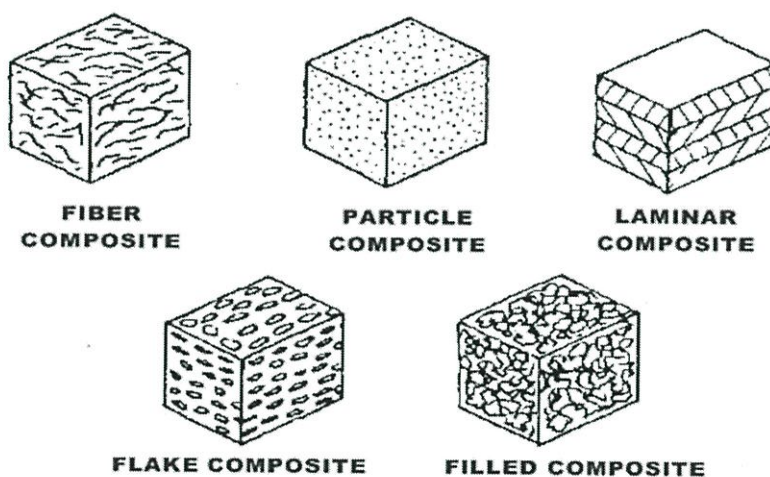
เป็นสารเคมีที่สำคัญที่สุดในการทำผลิตภัณฑ์ยาง โดยจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆในตัวยางให้ดียิ่งขึ้น สารวัลคาไนซ์ที่นิยมจะเป็นพวกกำมะถัน (S) โดยกำมะถันจะสามารถใช้ได้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ในกรณีที่ใช้กับน้ำยางจะต้องเลือกเกรดของตัวกำมะถันให้อยู่ในเกรดที่ดีหรือเกรดระดับห้องปฏิบัติการ

2.2.4 สารพิเศษอื่นๆ

ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้สำหรับยางทั่วไปแต่บางครั้งจะใส่ลงไปเมื่อกำลังมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) สารหน่วง (Retarder) สารยับยั้งแบคทีเรีย เป็นต้น [14]

2.3 วัสดุเชิงประกอบ (Composite material)

ความหมายกว้างๆของวัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต หมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบหมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักหรือเป็นเฟสต่อเนื่องเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้นเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงและทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลักอย่างโลหะ เซรามิกส์ หรือโพลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงโดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทโดยลำพัง



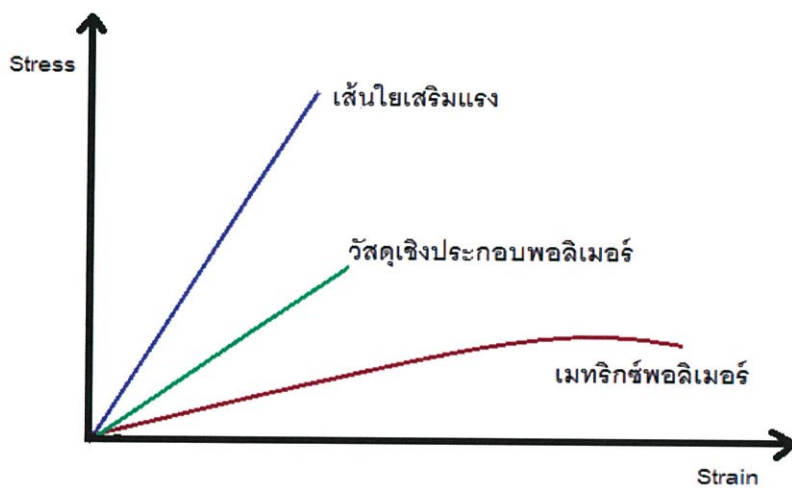
รูปที่ 2.3 ลักษณะของวัสดุเสริมแรง [15]

2.3.1 การจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์ จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

2.3.1.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC)

โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความ

ทนทานต่อการกัดกร่อนต่ำ การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงสูงสุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง แสดงดังรูปที่ 2.4 สมบัติเชิงกลนี้จะเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์และสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกัน ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ปกติ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้น วัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง แต่ในกรณีสารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่เต็มที่เท่ากับรูปเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปอนุภาคว่า สารเติม (Filler) [16]



รูปที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ [16]

2.3.1.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC)

วัสดุเชิงประกอบโลหะได้พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่เป็นเมทริกซ์โลหะที่ต้องการให้มีสมบัติพิเศษในการใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยาน สารเสริมแรงอาจอยู่ในลักษณะของอนุภาค เส้นใยหรือวิสเกอร์ก็ได้ นอกจากนี้ สารเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูงและทนความร้อนสูงด้วย เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการขึ้นรูปและสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะ จากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้สารเสริมแรงอนินทรีย์และเส้นใยแก้วไม่สามารถใช้เสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้ สารเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นสารเสริมแรงเซรามิกหรือสารเสริมแรงโลหะ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา และเส้นใยโบรอน เป็นต้น [16] โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบโลหะจะนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ สารเสริมแรงที่เติมเข้าไปจะเป็นการปรับปรุงสมบัติของเมทริกซ์โลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานนานขึ้นอย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานยังจำกัดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูงมาก ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบโลหะแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วัสดุเชิงประกอบโลหะที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในรถไฟ [17]

2.3.1.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิกส์ (Ceramic matrix composite, CMC)

เซรามิกส์เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนทานต่อการกัดกร่อนและอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อน เซรามิกส์จึงนำมาใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสียของเซรามิกส์ คือ เปราะและแตกหักง่ายเมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกส์เป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที สารเสริมแรงที่ใช้ในการเสริมแรงอาจอยู่ในรูปอนุภาค เส้นใยหรือวิสเกอร์ ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์และคาร์บอน เป็นต้น และสำหรับเมทริกซ์เซรามิกส์ ได้แก่ ซีเมนต์ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น สำหรับวัสดุเชิงประกอบเซรามิกส์ขั้นสูงที่มีความเหนียว ทนทานต่อการกัดกร่อน และสามารถประยุกต์ใช้ในงานที่อุณหภูมิสูงนั้น จะนิยมทำเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตจากเซรามิกส์ (Ceramic Components) ดังรูปที่ 2.6 และยังมีการใช้งานอย่างจำกัดเนื่องจากต้นทุนในกระบวนการผลิตที่สูง [16]



รูปที่ 2.6 วัสดุเชิงประกอบเซรามิกส์ที่ถูกใช้เป็นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ [18]

2.3.2 วัสดุผสมระดับนาโน (Nano composite)

วัสดุผสมระดับนาโน (nanocomposite) เป็นโครงสร้างระดับนาโนที่เป็นวัสดุผสมสังเคราะห์ที่มีเนื้อวัสดุหลายอย่างผสมกัน (multiphase material) โดยมีเนื้อวัสดุหนึ่งใดหรือหลายๆ เนื้อเป็นโครงสร้างที่มีมิติของขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ซึ่งส่วนมากแล้ววัสดุผสมระดับนาโนจะเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเนื้อวัสดุจำนวน 2 รูปเป็นอย่างน้อย และโดยส่วนใหญ่วัสดุผสมระดับนาโนนั้นจะเป็นโครงสร้างแบบพอลิเมอร์ที่ถูกทำให้สร้างพันธะกับชั้นผิวของวัสดุเส้นใยนาโนหรืออนุภาคนาโน เพื่อปรับปรุงและผลิตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งวัสดุนาโนจะมีสมบัติที่แตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดิมที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำนวนเพิ่มขึ้น ทำให้มีจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของอิเล็กตรอนบริเวณผิวมีความแตกต่างไปจากบริเวณในก้อนเนื้อวัสดุและยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุเช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงแสง เป็นต้น อย่างไรก็ตามได้มีการนำมาใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกหรือวัสดุที่สามารถกันน้ำหรือของเหลวได้ ซึ่งสามารถจำแนกวัสดุผสมระดับนาโนได้เป็น 3 ประเภท [19] ได้แก่

2.3.2.1 วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกชั้นกัน (nanolayers composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากเนื้อของวัสดุต่างๆ โดยแบ่งเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นมีขนาดในระดับนาโนเมตร

2.3.2.2 วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกเป็นเส้นใย (nanofilamentary composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากพื้นผิวที่มีการผสมเส้นใยฝังตัวลงไปไว้ภายในโครงสร้าง โดยเป็นเส้นใยที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร

2.3.2.3 วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกอนุภาค (nanoparticulate composite) เป็นโครงสร้างพื้นผิวที่มีการผสมเอาอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรฝังตัวไว้ภายในโครงสร้างนั้น ซึ่งคล้ายกับประเภทที่ 2.3.2.2 แต่เป็นอนุภาคนาโนแทนที่จะเป็นเส้นใยนาโน

2.4 ธาตุเงินอนุภาคระดับนาโนเมตรหรือซิลเวอร์นาโน

มนุษย์รู้จักโลหะเงินตั้งแต่สมัยโบราณ มีหลักฐานปรากฏว่ามีการค้นพบโลหะเงินหลังทองคำและทองแดงไม่มากนัก มีการกล่าวถึงเงินในพระคัมภีร์เก่าชาวอียิปต์ให้สัญลักษณ์ วงกลมแก่ทองคำ หมายถึงเป็นโลหะสมบูรณ์แบบ ส่วนโลหะเงินให้สัญลักษณ์ครึ่งวงกลมเพื่อแสดงว่าเป็นโลหะที่มีความสมบูรณ์แบบรองจากทองคำ ต่อมาครึ่งวงกลมนี้หมายถึงดวงจันทร์ด้วย เพราะโลหะเงินมีความแวววาวหรือสว่างทำนองเดียวกับดวงจันทร์ ชาวโรมันเรียกโลหะเงินว่า argentum ซึ่งเป็นที่มาของสัญลักษณ์เงิน (Ag) ส่วนคำอังกฤษ silver มาจาก Assyrians ธาตุเงินมีเลขอะตอม 47 เป็นธาตุที่ 2 ของหมู่ IB ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะและโลหะทรานซิชัน มีความหนาแน่น 10.5 g/cc ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลว 960.8 องศาเซลเซียส มีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก โลหะเงินไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารและกรดอินทรีย์ ด้วยเหตุนี้เงินจึงนำไปใช้ทำเครื่องประดับ ใช้เป็นตัวเร่ง (catalyst) ในปฏิกิริยาหลายประเภท และใช้ในอุตสาหกรรมเภสัชภัณฑ์ เป็นต้น ธาตุเงินในรูปแบบของธาตุอิสระเป็นพิษไม่มากนัก (เพราะ แอนไอออน) สารประกอบของเงินเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะเข้าสู่ระบบการหมุนเวียนโลหิตและถูกรีดิวซ์ทำให้โลหะเงินตกค้างตามเนื้อเยื่อ ทำให้ผิวหนังเกิดจุดสีดำหรือเทา สภาวะเช่นนี้เรียกว่า argyria [20] ซึ่งลักษณะธาตุเงินแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ธาตุเงินหรือซิลเวอร์ (Silver) [21]

เทคโนโลยีนาโน คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างที่ทำให้มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวที่จะสัมผัส และด้วยขนาดที่เล็กมากจึงทำให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น

ซิลเวอร์นาโนมีลักษณะสมบัติเหมือนกันกับซิลเวอร์ทั่วไป ซิลเวอร์นาโนเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นไอออนซิลเวอร์ที่แตกตัวอยู่ในน้ำได้ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ต่อไป โดยซิลเวอร์นาโนซึ่งเป็นของแข็งที่เป็นโลหะมักจะไม่ละลายน้ำ แต่จะอยู่ลักษณะรวมเป็นกลุ่มก้อนหรือในรูปของอนุภาคนาโนที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อซิลเวอร์นาโนอยู่ในน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนของซิลเวอร์และเกิดการออกซิเดชันที่ผิว ซึ่งจะทำให้ได้ไอออนของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในรูปของ Ag^+ ที่ล้อมรอบด้วยซิลเวอร์นาโนที่ยังอยู่ในรูปโลหะหรืออนุภาคนาโนอยู่ในน้ำ อนุภาคซิลเวอร์นาโนเมื่ออยู่ในน้ำจะให้ไอออนของซิลเวอร์ด้วย

จากการที่ซิลเวอร์นาโนมีขนาดเล็กกว่าซิลเวอร์ทั่วไปมากจึงทำให้มีลักษณะสมบัติในส่วนของพื้นที่ผิวที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้นาโนซิลเวอร์สามารถรวมเป็นก้อนกรานูลได้ ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่ซิลเวอร์นาโนมีขนาดเล็กมารวมกันแต่ยังคงมีขนาดในระดับเล็กมาก ส่งผลให้ลักษณะสมบัติอื่นๆ เช่น พื้นที่ผิว ชนิดประจุบนพื้นผิว ซึ่งส่งผลให้เกิดการนำนาโนซิลเวอร์ไปเป็นวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น พลาสติก ผ้า กระจก สี และสารเคลือบ เป็นต้น [22]

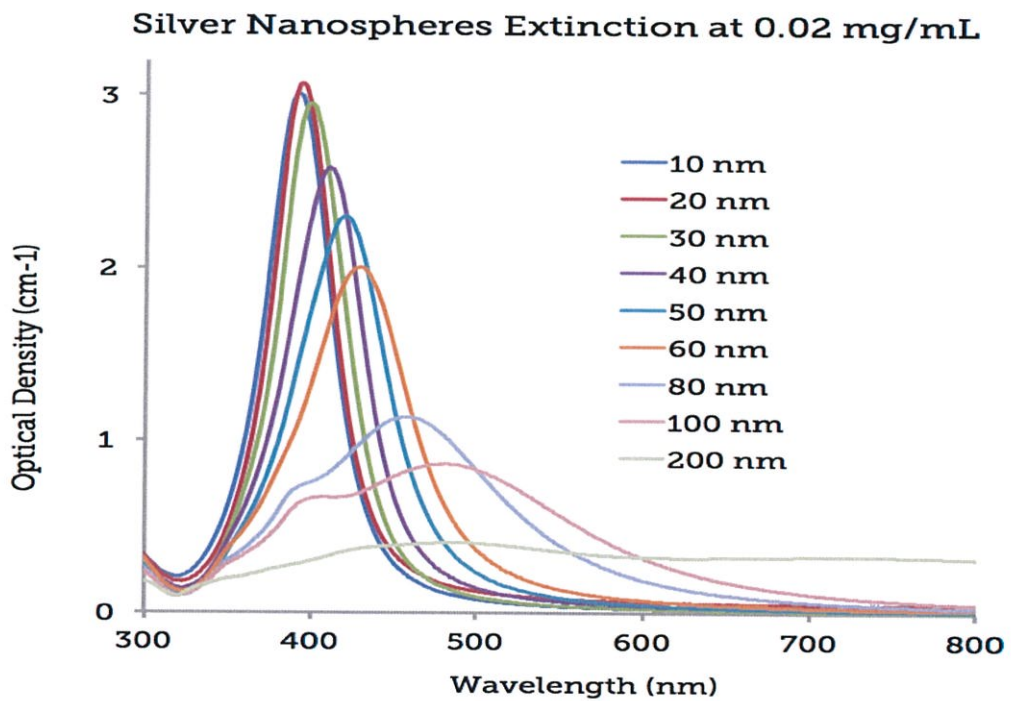
2.4.1 สมบัติเชิงแสง

โดยทั่วไปแล้วอนุภาคของเงินจะมีสีเงินวาว แต่ถ้าเราย่อหรือตัดให้ขนาดของอนุภาคให้เล็กลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับนาโนเมตร จะส่งผลให้อนุภาคของเงินนั้นมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มากกระทบมาก ทำให้อนุภาคนาโนของเงินมีสีเหลืองเข้ม จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า Surface Plasmon Resonance (SPR) เป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุ ที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ ที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่น กระจกหรือเงินกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาด ยอดคลื่น และความกว้างของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนต์ของวัสดุต่างๆ จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมรอบๆ วัสดุนั้น อย่างไรก็ตามโลหะส่วนใหญ่ จะมีความถี่เรโซแนนต์ อยู่ในช่วงใกล้รังสียูวีซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่มองเห็น ส่งผลให้เมื่ออนุภาคของซิลเวอร์เมื่อมีขนาดเล็กมากๆจะมีสีที่เปลี่ยนแปลงในลักษณะ blue ship แสดงดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 นอกจากนี้โลหะชนิดอื่นก็สามารถเกิดปรากฏการณ์เชิงแสงได้ แต่อนุภาคนาโนของโลหะ

เกือบทุกชนิดไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมตามปกติ จึงทำให้ไม่ค่อยพบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่นๆ [23]



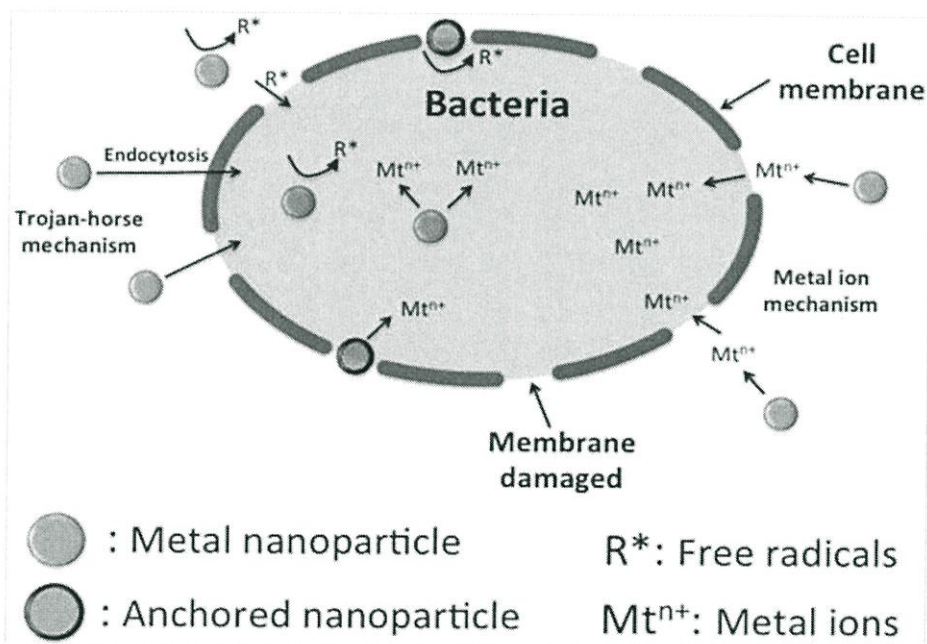
รูปที่ 2.8 Silver Nanoparticles in Solution [24]



รูปที่ 2.9 กราฟสเปกตรัมของสารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร [24]

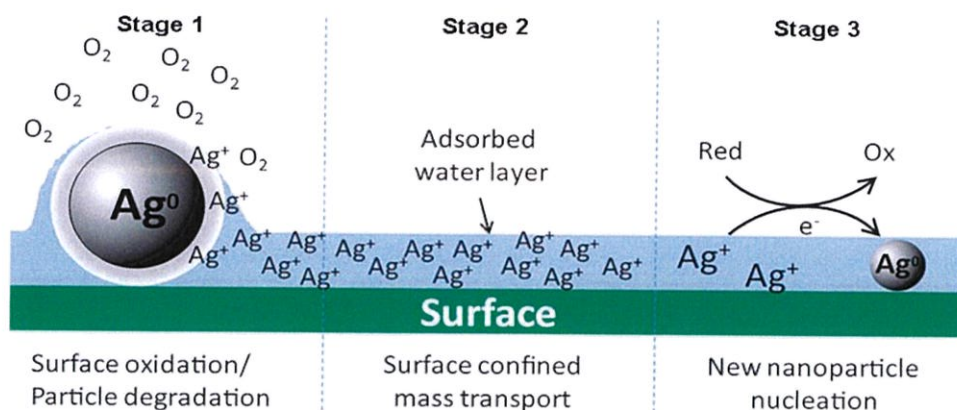
2.4.2 สมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ปัจจุบันได้มีการนำเอานาโนเทคโนโลยีมาแยกโลหะเงินให้มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร เรียกว่า อนุภาคซิลเวอร์นาโน ขนาดที่เล็กลงมากทำให้ไปเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียทำให้มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมหลายร้อยเท่า ซึ่งกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนนั้นพบว่า อนุภาคซิลเวอร์นาโน (Ag^0) เมื่อสัมผัสกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียหรือเชื้อราจะสามารถแพร่กระจายไปเกาะตามผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เกิดภาวะการรวมตัวของ DNA (Condensation) ภายในเซลล์ ซึ่งซิลเวอร์นาโนเมื่ออยู่ในน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนของซิลเวอร์และเกิดการออกซิเดชันที่ผิวทำให้ได้ไอออนของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในรูปของ Ag^+ ที่ล้อมรอบด้วยซิลเวอร์นาโน และทำให้ประจุบวกของซิลเวอร์ (Ag^+) เข้าไปจับกับเอนไซม์โปรตีนเอส (Proteinase) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบเมตาบอลิซึมของเซลล์ และจะจับกับหมู่ซัลไฟไฮดริล (Sulfhydryl) (-SH) ของเอนไซม์ที่มีอะตอมของซัลเฟอร์ (S) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีประจุเป็นลบ (S^{2-}) และทำให้เกิดกระบวนการทำงานของเอนไซม์หยุดการทำงานจนกระทั่งเซลล์แบคทีเรียหยุดการเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพตายในที่สุด [25] หรือกล่าวคือ ซิลเวอร์นาโนเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ส่งผลให้มีการแตกตัวเป็นไอออนได้อย่างรวดเร็วกว่าซิลเวอร์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ารวมถึงมีความสามารถในการดูดซับสูง ดังนั้นเมื่อเข้าไปอยู่ภายในเซลล์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและอาจรบกวนการทำงานของสารชีวโมเลกุลเช่น โปรตีนและ DNA ได้ ซึ่งขนาด รูปร่าง รวมถึงสิ่งที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวของซิลเวอร์นาโนก็เป็นปัจจัยร่วมในการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเช่นกัน [26]



รูปที่ 2.10 กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคโลหะขนาดนาโนเมตร [27]

2.4.3 กลไกในการเกิดซิลเวอร์นาโน



รูปที่ 2.11 การเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโน [26]

ความชื้นสัมพัทธ์มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอนุภาคของซิลเวอร์ ซึ่งภายใต้สภาวะที่มีความชื้นมากกว่า 50% อนุภาคขนาดนาโนเมตรจะก่อตัวขึ้นและอนุภาคที่ก่อตัวขึ้นจะได้รับปฏิกิริยาที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งที่เคลือบอยู่บนพื้นผิว ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคที่เก็บไว้เป็นเวลา 3 สัปดาห์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0% ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แต่อนุภาคเดียวกันที่เก็บไว้ภายใต้เงื่อนไขที่มีความชื้น แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาที่น่าทึ่ง การเปลี่ยนแปลงในรูปร่างขนาดและจำนวนของอนุภาคนาโนจะเห็นได้ภายในไม่กี่ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าแสงยังมีอิทธิพลต่อการลดและการก่อตัวใหม่ของอนุภาคนาโน (กระบวนการ photoreduction) ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นมาจากการเร่งปฏิกิริยาประจุนพื้นผิวในบริเวณที่ขอบน้ำ [26]

2.5 พอลิไวนิลไพโรลิโดน Polyvinylpyrrolidone (PVP)

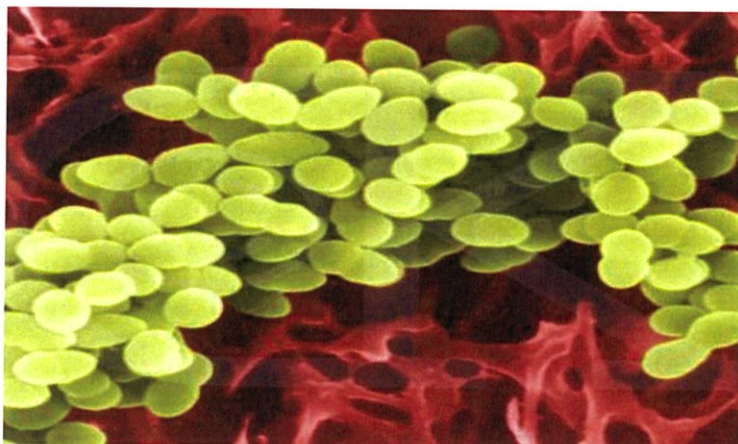
โพลีไวนิลไพโรลิโดน เป็นกลุ่มของพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำและตัวทำละลายแอลกอฮอล์ได้ในทางเคมีโพลีไวนิลไพโรลิโดนคือสารพอลิเมอร์แลคแทม (lactam) ภายในเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์ (amide) เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างของแต่ละหน่วย โพลีไวนิลไพโรลิโดนมีความเป็น amphiphilic คุณสมบัติคือ โมเลกุลเดียวกันมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) กลุ่มเอไมด์ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) กลุ่มเมทิลีน ในส่วนของ backbone และส่วนของวงแหวน ซึ่งเป็นสมบัติไฮโดรโฟบิก มีชื่อทางเคมีคือ 1-ethenylpyrrolidin-2-one สูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่ง PVP นั้นจะมีหลายประเภทโดยแต่ละประเภทจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันเช่น 10,000 40,000 60,000 และ 360,000 เป็นต้น [28] มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีเหลืองอ่อนๆ โพลีไวนิลไพโรลิโดนถูกนำมาใช้ได้หลากหลายด้าน สิ่งที่น่าสนใจทางด้านสิ่งแวดล้อมก็คือ ลักษณะโครงสร้างมีความคล้ายกับโปรตีน ซึ่งได้ให้ความสำคัญสำหรับการนำไปใช้ในทางการแพทย์เป็นหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่งโพลีไวนิลไพโรลิโดนมีความเป็นพิษต่ำมาก นิยมนำไปใช้เพื่อเป็นสารเสริมแรงการยึดเกาะ (binder) และเหมาะแก่การทำเป็นสารเคลือบ (Coating) จึงสามารถนำมาใช้กับอาหาร ยา หรือเครื่องสำอางได้ [29] ดังนั้นในอุตสาหกรรมต่างๆจึงนิยมใช้โพลีไวนิลไพโรลิโดนเป็นสารรักษาความเสถียร

ปัจจัยที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้แก่ อุณหภูมิโดยแบคทีเรียส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 25-40 องศาเซลเซียส และความเป็นกรด-ด่าง ของสภาวะแวดล้อมมีผลต่อการเจริญของแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่เจริญได้ดีในช่วง pH 6–8 เป็นต้น [30]

2.6.1 *Staphylococcus aureus*

Staphylococcus aureus เป็นแบคทีเรียก่อโรค (pathogen) ที่สำคัญในอาหาร แบคทีเรียชนิดนี้ย้อมติดสีแกรมบวก (Gram positive bacteria) มีรูปร่างเป็นทรงกลม (coccus) อยู่รวมกันเป็นพวงคล้ายพวงองุ่น ไม่สร้างสปอร์ (non-spore forming bacteria ดู bacterial spore ด้วย) ไม่เคลื่อนไหว แสดงดังรูป 2.14 ส่วนใหญ่ไม่มีแคพซูล ให้ผลบวกในการทดสอบ catalase และในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะสลายน้ำตาลกลูโคสให้กรดอินทรีย์ จัดอยู่ในกลุ่ม facultative anaerobe คือเจริญได้ในที่มีอากาศและไม่มีอากาศ แต่เจริญได้ดีกว่าในสภาวะที่มีอากาศ

Staphylococcus aureus สร้างสารพิษ (toxin) ชนิดเอนทีโรทอกซิน (enterotoxin) สารพิษที่สร้างมีสมบัติพิเศษ คือ ทนความร้อน



รูปที่ 2.14 ลักษณะของเชื้อ *Staphylococcus aureus* [30]

Staphylococcus aureus ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษชนิด intoxication ซึ่งเกิดจากบริโภคอาหารที่มีสารพิษ enterotoxin ที่เชื้อสร้างขึ้น ปนเปื้อนในปริมาณน้อยกว่า 1 ไมโครกรัม จะสามารถทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยได้ มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียน เป็นตะคริวในช่องท้องและอ่อนเพลีย ผู้ป่วยบางรายอาจมีอาการปวดศีรษะ เป็นตะคริวที่กล้ามเนื้อ และมีการเปลี่ยนแปลงความดันโลหิตเป็นระยะๆ รวมทั้งอาจมีการเด่นของชีพจรผิดปกติ [30]

2.6.2 *Escherichia coli*

Escherichia coli เขียนย่อว่า *E. coli* เป็นแบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative bacteria) รูปร่างเป็นแท่ง (rod shape) ไม่สร้างสปอร์ เป็น facultative anaerobe เจริญได้ทั้งที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน อยู่ในวงศ์ *Enterobacteriaceae* และเป็นแบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่มโคลิฟอร์ม (coliform) ประเภท fecal coliform แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นโคลิฟอร์มที่พบในอุจจาระของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น จึงใช้เป็นตัวชี้บ่งชี้สุขลักษณะของอาหารและน้ำ *E. coli* ส่วนใหญ่ไม่ใช่จุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) แต่บางชนิดที่ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ (food poisoning) หรือเรียกว่า *Enterovirulent Escherichia coli* group (EEC group) มี 4 ประเภทคือ [30]

1. *Enterotoxigenic E. coli* (ETEC) เป็น *E. coli* ซึ่งทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ อาการทั่วไปคือ ท้องร่วง ปวดท้อง ไข้ต่ำ คลื่นไส้ และ อ่อนเพลีย การติดเชื้อหรือแสดงอาการต่อเมื่อได้รับเชื้อเข้าไปประมาณ 100 ล้าน ถึง 10 พันล้านเซลล์ โดยระหว่างการเจริญจะสร้างสารพิษที่ทำให้เกิดการหลั่งของของเหลว (fluid secretion) แหล่งที่พบคือน้ำที่ปนเปื้อน แล้วไปปนเปื้อนต่อในอาหาร หรือจากคนป่วยที่สัมผัสหรือปรุงอาหาร ปัจจุบันการวิเคราะห์เชื้อตัวนี้ในอาหารทำได้โดยใช้ gene probe ซึ่งใช้เวลา 3 วัน หรือใช้วิธีทดสอบสารพิษโดยทั่วไป ซึ่งใช้เวลาอย่างน้อยที่สุด 7 วัน

2. *Enteropathogenic E. coli* (EPEC) เป็น *E. coli* ชนิดที่ถือว่าเป็นเชื้อโรคที่ระบาดโดยมีความรุนแรงที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับการขับสารพิษทั่วไปของ EEC ชนิดอื่น EPEC แพร่ไปในคนและสัตว์หลายชนิด เช่น วัวควาย และหมู มักเป็นโรคที่เป็นกับเด็ก ทำให้อุจจาระร่วงเป็นน้ำหรือเป็นเลือด คล้ายกับอาการที่เกิดจากเชื้อ *Shigella* ซึ่งเรียกว่า ชิกะทอกซิน (shigatoxin) ด้วยเช่นกัน ปริมาณเชื้อที่ก่อโรคอาจในปริมาณต่ำ dysenteriae หรือมากกว่า 10⁶ อาหารที่พบเชื้อนี้คือ เนื้อวัว เนื้อไก่ดิบและจากน้ำปนเปื้อนที่นำมาขงนมให้เด็ก

3. *Enterohemorrhagic E. coli* (EHEC) หรือ *E. coli* 0157:H7 พิษที่สร้างโดย *E. coli* 0157:H7 เป็นประเภท verotoxin ที่คล้ายกับ shigatoxin ที่สร้างโดย *Shigella dysenteriae* ทำให้เกิดความเสียหายให้แก่เยื่อของลำไส้ ความรุนแรงคือทำให้เกิดลำไส้ใหญ่อักเสบจนตกเลือด (hemorrhagic colitis) อาการคือ ปวดท้องรุนแรง อุจจาระร่วงเป็นตอนแรก แต่กลายเป็นมูกเลือดต่อมา อาจมีอาเจียนบ้าง และมีไข้ต่ำหรือไม่มี อาหารที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เนื้อบดหรือแฮมเบอร์เกอร์ดิบหรือไม่ค่อยสุก นอกจากนี้ยังอาจพบในหน่ออัลฟัลฟา น้ำผลไม้ที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ ไส้กรอกหมูปนเนื้อวัว (dry-cured salami) เป็นต้น บางครั้งคนไข้มีอาการจากการมีสารในปัสสาวะปะปนในเลือด (hemolytic uremic syndrome: HUS) ที่มีลักษณะพิเศษคืออาจทำให้ไตวายถาวรได้

4. *Enteroinvasive E. coli* (EIEC) ทำให้เกิดอาการคล้ายของโรคบิดจากเชื้อ *Shigella dysenteriae* หรือบิดมีตัว (bacillary dysentery) ทำให้ท้องร่วงโดยมีเลือดหรือมูกในอุจจาระของผู้ที่ติดเชื้อ ปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดอาการ ประมาณ 10 เซลล์ (เท่ากับ *Shigella*) อาหารที่เกี่ยวข้อง ยังไม่ชัดเจน แต่มีรายงานว่าเกี่ยวกับเนื้อแฮมเบอร์เกอร์ และน้ำนมที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ เวลาฟักตัวประมาณ 12 ถึง 72 ชั่วโมง



รูปที่ 2.15 ลักษณะของเชื้อ *Escherichia coli* [30]

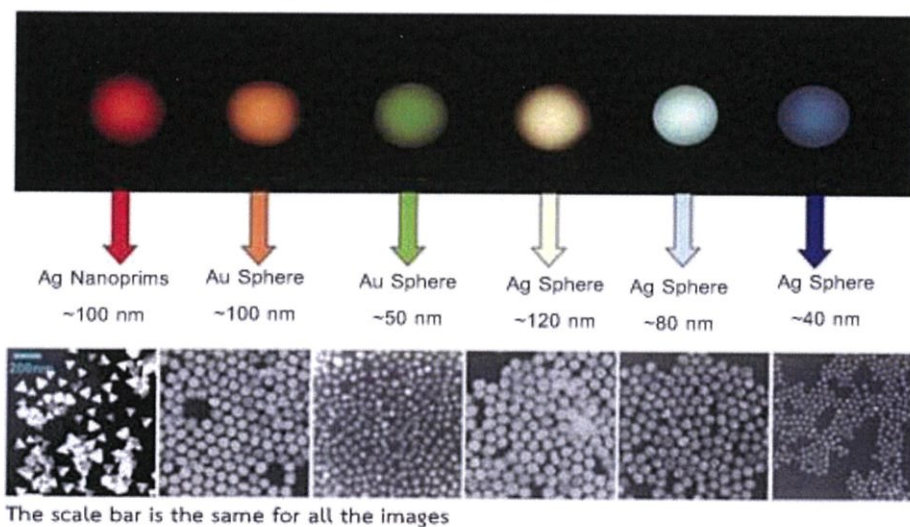
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Preparation of PVA Stabilized Silver Nanoparticles by Gamma Irradiation

งานวิจัยนี้ได้นำประโยชน์ของการใช้รังสีแกมมาจากต้นกำเนิด ^{60}Co มาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินโดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) เป็นตัวทำให้เสถียร (stabilizer) ร่วมกับเอทานอล (ethanol) ซึ่งเป็นตัวจับอนุมูลอิสระไฮดรอกซี (hydroxy free radical, OH $^{\cdot}$) อนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปใช้ในการเตรียมแผ่นเจลปิดแผล กลไกในการเกิดอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการฉายรังสีขึ้นอยู่กับปฏิกิริยารีดิวซ์ไอออนเงิน (Ag^+) โดย hydrated electron (e_{aq}^-) และอนุมูลอิสระไฮโดรเจน (hydrogen free radical, H $^{\cdot}$) ที่เกิดในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ขนาดของอนุภาคนาโนเงินแสดงดังรูปที่ 2.16

PVA สามารถป้องกันการรวมมวล (agglomeration) หรือการที่อนุภาคนาโนรวมกันเป็นก้อนเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กสามารถเคลื่อนย้ายและชนกันและทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน การมี PVA ในระบบเมื่อฉายรังสี PVA เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้ระบบมีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลดความเร็วของการเคลื่อนย้ายของอนุภาคนาโนและลดโอกาสในการชนของอนุภาคนาโนทำให้ขนาดของอนุภาคนาโนเล็กลง และการที่ PVA ดูดซับบนผิวของอนุภาคนาโนสามารถลดพลังงานที่ผิว (surface energy) และลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ [32]

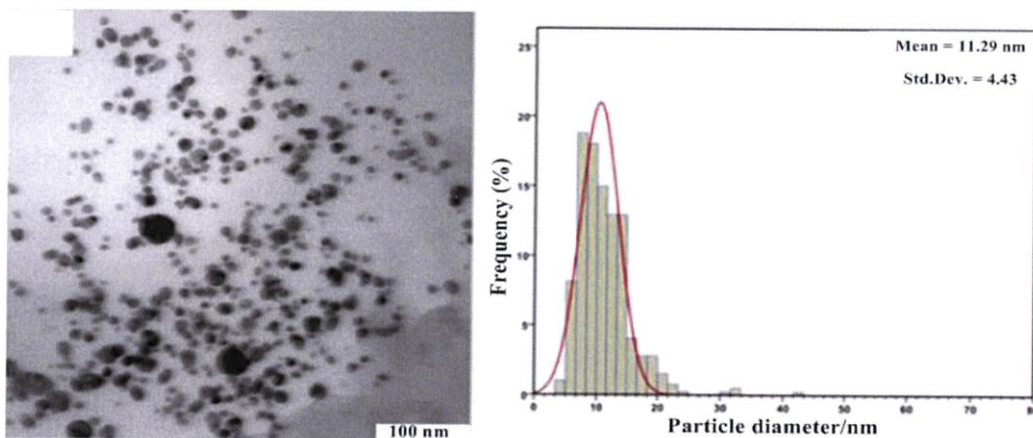
Rayleigh Light-Scattering of Nanocrystals: Shape, Size, and Composition Matter



รูปที่ 2.16 ความแตกต่างของขนาดอนุภาคนาโนเงิน (Ag nanoparticles) และอนุภาคนาโนทอง (Au nanoparticles) ที่มีต่อสีของสารละลาย [32]

2.7.2 Preparation and characterization of gelatin mediated silver nanoparticles by laser ablation

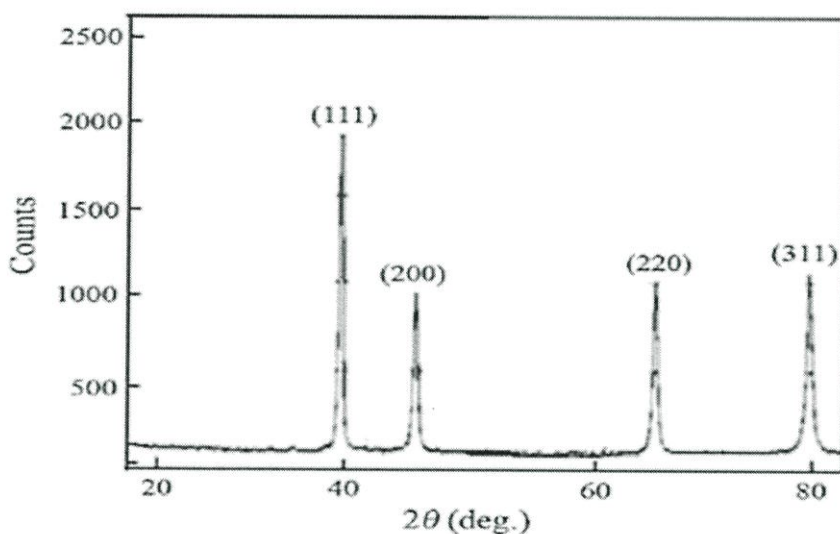
Majid Darroudi et al. ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมอนุภาคแขวนลอยนาโนเงินในเจลาตินโดยใช้ nanosecond pulsed Nd:YAG laser ที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ใช้ความเข้มของพลังงาน 0.6 J/pulse เป็นการเตรียมอนุภาคนาโนเงินผสมเจลาตินโดยใช้วิธีการฉายเลเซอร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่มีการใช้รีเอเจนต์อื่นๆ โดยการศึกษาจากเครื่อง UV- Vis spectroscopy แสดงให้เห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคนาโนเงินเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการฉายเลเซอร์ ซึ่งทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 9 นาโนเมตร ถึง 15 นาโนเมตร และในระหว่างการฉายเลเซอร์ สีของสารละลายมีการเปลี่ยนจากสารละลายใสไม่มีสีไปเป็นสีเหลืองอ่อน สีเหลืองและสีน้ำตาลอ่อนในที่สุด ที่น่าสนใจคือ สีของสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้นเป็นผลจากอัตราการฉายเลเซอร์ซ้ำที่สูงขึ้น สีที่ได้จึงบอถึงถึงความเข้มที่สูงขึ้นของอนุภาคนาโนเงิน ซึ่งได้รับการยืนยันจากการทดสอบโดยเครื่อง UV-Visible spectroscopy ในส่วนของการกระจายขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนเงิน จะศึกษาได้จากอัตราการฉายของเลเซอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะได้อนุภาคนาโนเงินกระจายได้มากที่สุดที่ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ การทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราการฉายเลเซอร์ซ้ำเป็นผลทำให้ขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการกระจายของขนาดอนุภาค และตัวเจลาตินยังทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพที่ดี ซึ่งสามารถครอบคลุมอนุภาค และป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันและการโตของอนุภาคได้ และภาพ TEM ของอนุภาคนาโนเงินในสารละลายคอลลอยด์ แสดงดังรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนเงิน ขึ้นอยู่กับการใช้อัตราการฉายซ้ำของเลเซอร์ งานวิจัยนี้มีข้อดีที่สำคัญคือ งานวิจัยนี้มีความปลอดภัย รวดเร็ว และ ง่ายต่อการนำไปใช้ [33]



รูปที่ 2.17 ขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM [33]

2.7.3 Synthesis of powdered silver nanoparticles using hydrogen in aqueous medium

Kushal D. Bhatte et al. ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ผงซิลเวอร์นาโนโดยวิธีนี้ถือเป็นการทำปฏิกิริยารวบในขั้นตอนเดียว โดยใช้ polyvinyl alcohol (PVA) ที่ถูกไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์มาทำปฏิกิริยารีดักชันกับซิลเวอร์ไนเตรท โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวรีดิวซ์ในปฏิกิริยา เมื่อ PVA ถูกไฮโดรไลซิส อย่างสมบูรณ์ มันจะทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพที่ดี และ PVA ยังมีความเป็นพิษต่ำมาก ซึ่งนับว่าเป็นการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สามารถลดมลพิษได้เป็นอย่างดี และจากการทดสอบด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโน มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร และจากการทดสอบโดยเครื่อง XRD สามารถยืนยันการก่อตัวโครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในแบบ face centered cubic ที่ระนาบ (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0) และ (3 1 1) แสดงดังรูปที่ 2.18 ซึ่งจากปฏิกิริยารีดักชันดังกล่าวจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงซิลเวอร์นาโนในปริมาณมาก [34]

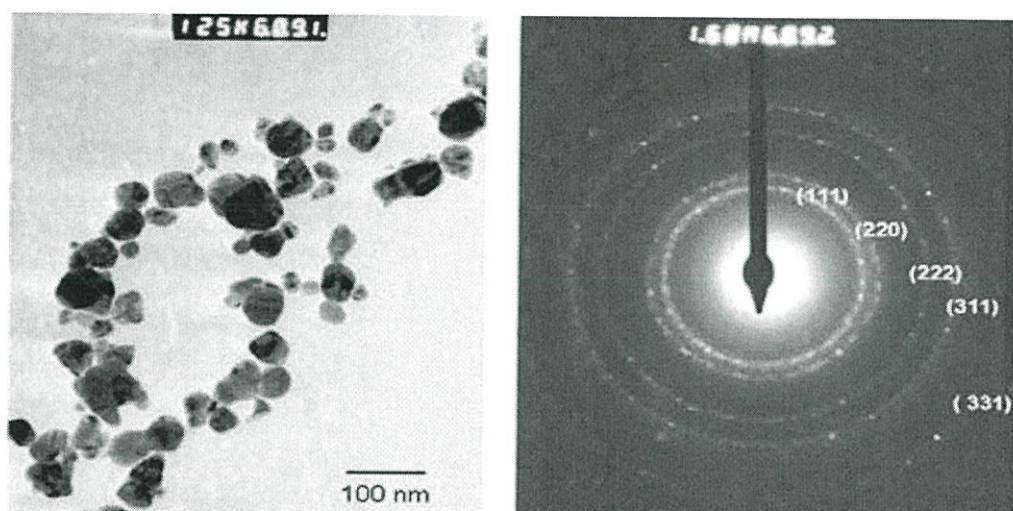


รูปที่ 2.18 กราฟสเปกตรัม XRD ของซิลเวอร์นาโน [34]

2.7.4 Synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction method and their antibacterial activity

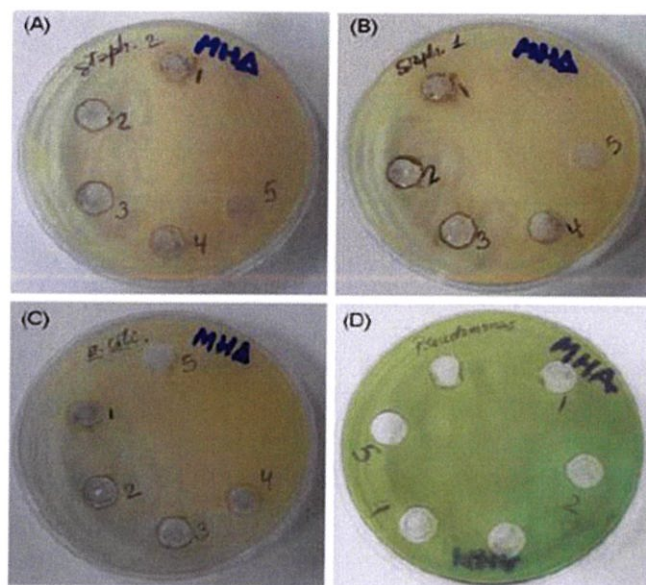
Maribel G. et al. ได้ทำการศึกษาวิจัยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินที่มีสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียจากปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรทมาเป็นสารตั้งต้น แล้วใช้ไฮดร่าซีนไฮเดรตและโซเดียมซัลไฟด์เป็นตัวรีดิวซ์ โดยใช้ Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) และโซเดียมซัลไฟด์เป็นสารรักษาเสถียรภาพ ซึ่งการก่อตัวของอนุภาคนาโนเงินได้รับการตรวจสอบโดยใช้เครื่อง UV-Visible spectrometer จากเครื่องแสดงพีคของการดูดกลืนแสงที่ 405-418 นาโนเมตร จากทฤษฎีระบุว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนเงินในสารแขวนลอย คือ ประมาณ 60 นาโนเมตรและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโนเงินที่ถูกสังเคราะห์ได้ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 9 11 24 และ 30 นาโนเมตร และจากการทดสอบด้วยเทคนิค energy-dispersive spectroscopy

(EDX) สามารถตรวจการแพร่กระจายของอนุภาคนาโนที่มีการปรากฏสัญญาณของธาตุเงิน โดยไม่พบพีคของสิ่งเจือปน ส่วนพีคที่ได้ในจากการตรวจสอบของเครื่อง High-energy electron diffraction (HEED) ยืนยันได้ว่าโครงสร้างของอนุภาคก่อตัวแบบ face-centered-cubic ซึ่งขนาดเฉลี่ยและสัญญาณวิทยาของอนุภาคนาโนเงินถูกวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งภาพ TEM ที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนเงินมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน มีการกระจายตัวที่ดีในขณะที่รัศมีของอนุภาคที่อยู่ระหว่าง 10 และ 20 นาโนเมตร



รูปที่ 2.19 ลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM (ซ้าย) และ HEED (ขวา) [7]

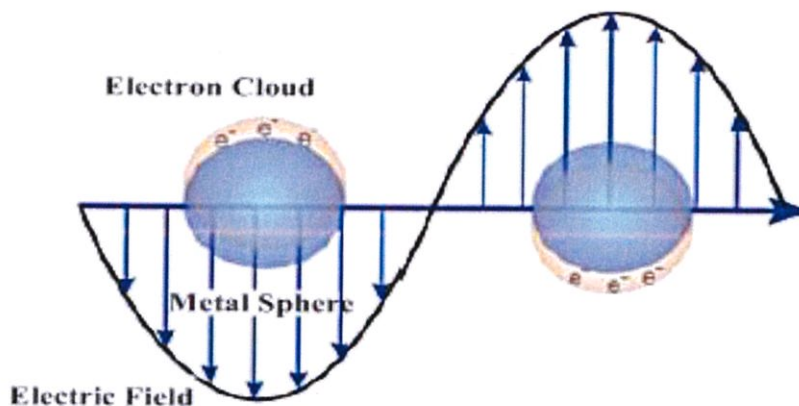
ในส่วนของการต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนเงินได้ถูกตรวจวัดโดยวิธี Kirby-Bauer ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อนุภาคเงินแขวนลอยสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและการเพิ่มขึ้นของแบคทีเรีย รวมทั้งมีการต่อต้านแบคทีเรียหลายชนิด เช่น methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* *S. aureus* *Escherichia coli* และ *Pseudomonas aeruginosa* ซึ่งการต้านแบคทีเรียได้ใช้นี้ใช้ความเข้มข้นของเงินที่ต่ำมาก ซึ่งใช้ไปแค่ 6.74 ไมโครกรัม / มิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 2.20 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวัสดุได้เช่น ใส่ในยาเพื่อลดการติดเชื้อ เช่นเดียวกับการป้องกันการลุกลามของแบคทีเรียในวัสดุขาเทียม สายสอดภายในหลอดเลือดเทียม วัสดุทันตกรรม วัสดุสแตนเลส และยังสามารถทำงานเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์บนผ้าสิ่งทอหรือสามารถนำมาใช้สำหรับการบำบัดน้ำ ดังนั้นในการพัฒนาการสังเคราะห์จะเน้นที่การควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนเงิน ซึ่งอนุภาคนาโนเงินจะได้รับการสังเคราะห์โดยใช้วิธีการที่แตกต่างกันหลายวิธี อย่างเช่น Electrochemical method Thermal decomposition Laser ablation Microwave irradiation และ sonochemical synthesis เป็นต้น [7]



รูปที่ 2.20 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* (A) methicillin-resistant *S. aureus* (B) *Escherichia coli* (C) และ *Pseudomonas aeruginosa* (D) [7]

2.7.5 Synthesis of Silver Nanoparticles by using Sodium Borohydride as a Reducing Agent

ในปี ค.ศ. 2013 Mavani และ Mihir Shah ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์ เนื่องจากซิลเวอร์นาโนมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ซึ่งผู้วิจัยนั้นคิดว่าการทำให้ซิลเวอร์มีขนาดอนุภาคเล็กลงจนเป็นระดับนาโนนั้นจะช่วยให้สามารถเข้ากับสิ่งมีชีวิตได้ดีขึ้น และเมื่อมีขนาดเป็นนาโนแล้วจะแสดงสมบัติที่แตกต่างจากตอนที่เป็ซิลเวอร์ขนาดปกติ จึงได้ทำการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์ เนื่องจากเป็นสารที่นิยมใช้และหาง่าย แต่จากขั้นตอนการเตรียม จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้ใช้วิธีการเตรียมที่หลายขั้นตอน ใช้สารหลายตัว ถึงแม้จะไม่ยุ่งยากมากแต่ก็ทำให้เสียเวลา ซึ่งซิลเวอร์นาโนที่ได้จะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอยเป็นสีน้ำตาล งานวิจัยนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับสมบัติของซิลเวอร์นาโนไว้ว่าซิลเวอร์นาโนมีสมบัติเชิงแสงที่เป็นเอกลักษณ์ สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดกลืนและกระจายแสงที่รุนแรง เนื่องจากอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของโลหะเกิดการแกว่งเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะ ซึ่งการแกว่งของอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า Surface Plasmon Resonance (SPR) แสดงดังรูปที่ 2.21 สมบัติเชิงแสงของซิลเวอร์นาโนจะเปลี่ยนไปเมื่ออนุภาคเกิดการเกาะตัวกันและอิเล็กตรอนตัวนำที่ผิวของอนุภาคเกิดการดีโคฮีเลชันและแชร์กับอนุภาคใกล้เคียง สมบัติด้านการต้านเชื้อแบคทีเรียของซิลเวอร์นาโนเมื่อเทียบกับซิลเวอร์ปกติแล้วนั้น ซิลเวอร์นาโนจะมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากกว่าซิลเวอร์ขนาดปกติ เนื่องจากพื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยากับแบคทีเรียมีมากกว่า [35]

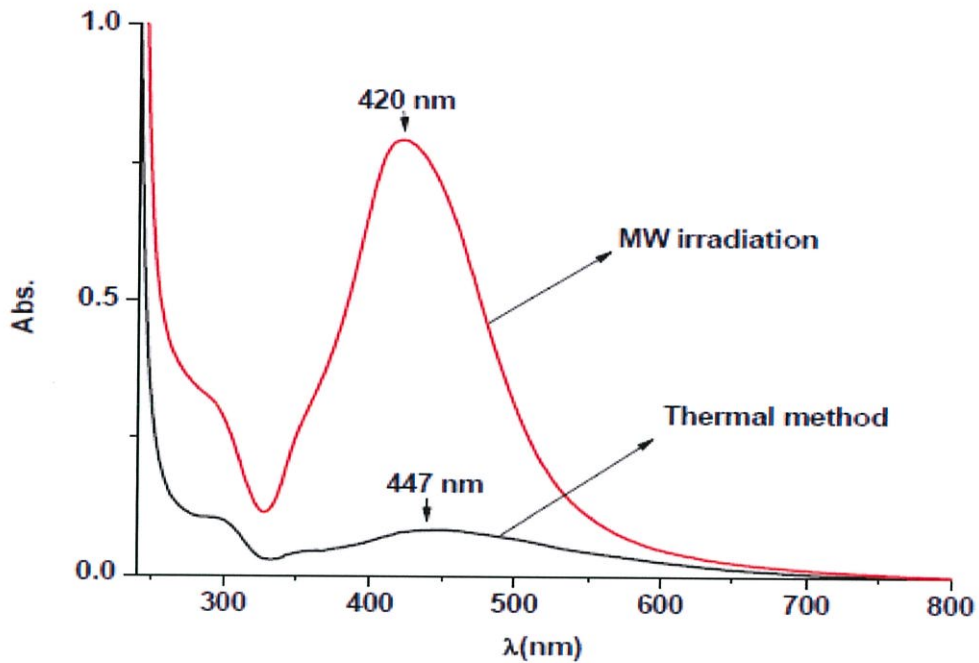


รูปที่ 2.21 การสั่นของอิเล็กตรอนอิสระที่พื้นผิวของโลหะ เมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะของโลหะนั้นๆ [35]

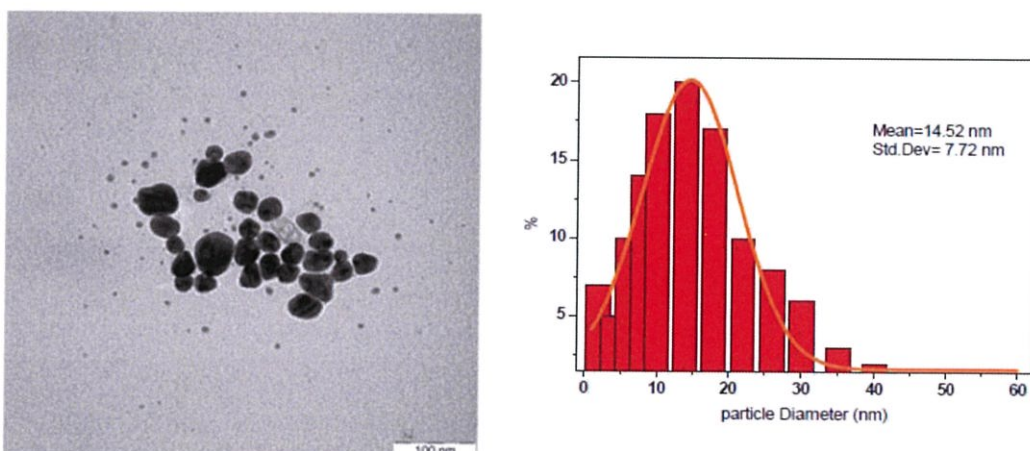
2.7.6 Green Formation of Spherical and Dendritic Silver Nanostructures under Microwave Irradiation without Reducing Agent

ในปีค.ศ. 2012 Monir Noroozi et al. ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน โดยการฉายรังสีไมโครเวฟ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์โดยปราศจากสารรีดิวซ์ มีเพียงน้ำที่ใช้เป็นตัวทำละลายและ polyvinylpyrrolidone (PVP) ที่ใช้เป็นสารรักษาสภาพเท่านั้น ซึ่งน้ำนั้นถือเป็นสารรีดิวซ์ในตัวเองเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ในน้ำนั้นถือว่าสูง เนื่องจากน้ำมีค่าไดอิเล็กทริกสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนด้วยสารที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและในงานวิจัยได้กล่าวไว้ว่า การสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนด้วยการฉายรังสีไมโครเวฟนั้นสามารถได้ทั้งซิลเวอร์นาโนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นทรงกลมและแบบเดนไดรต์ ซึ่งจะได้รูปทรงใดนั้นขึ้นอยู่กับเวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟเป็น 20 40 60 และ 90 วินาที ซึ่งผลที่สามารถบ่งบอกได้ว่าสารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นซิลเวอร์นาโนแล้วนั้นสามารถดูได้จากสีของสารแขวนลอยคือ ใช้เวลาฉายรังสี 20 และ 40 วินาที สารจะเปลี่ยนจากใสเป็นสีน้ำตาล และถ้าใช้เวลา 60 และ 90 วินาที สารจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม และเมื่อนำสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าเมื่อใช้เวลาในการฉายรังสีมากขึ้น ซิลเวอร์นาโนจะมีขนาดอนุภาคโตขึ้น แต่ก็ยังถือว่าขนาดอนุภาคนั้นกระจายตัวเป็นช่วงแคบ ซึ่งเป็นผลจากการสังเคราะห์ด้วยรังสีไมโครเวฟ และยังมี PVP เป็นตัวช่วยป้องกันการเกาะกลุ่ม จากรูปที่ 2.22 2.23 และ 2.24 จะเป็นการเปรียบเทียบภาพที่ได้จากเทคนิค UV-visible และ TEM ตามลำดับ ของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการฉายรังสีไมโครเวฟ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีการฉายรังสีไมโครเวฟนั้นจะได้ซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอและมีความเข้มข้นสูงกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม และพบว่าเมื่อใช้ PVP เป็นสารรักษาสภาพจะช่วยให้สารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรมีความเสถียรแม้เก็บไว้เป็นเวลา 6 เดือนรูปที่ 2.25 และยังพบว่าซิลเวอร์นาโนที่ฉายด้วยรังสีไมโครเวฟเป็นเวลา 90 วินาทีจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์เกิดขึ้น ซึ่งจะ

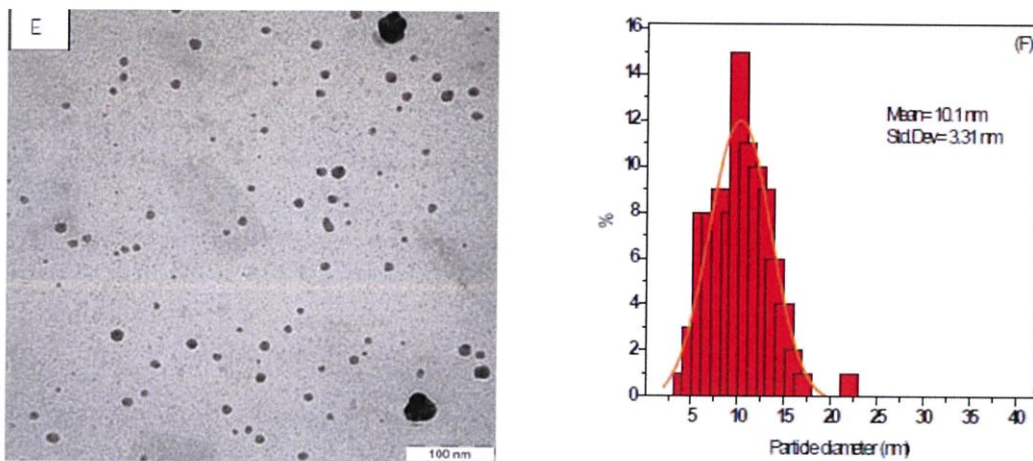
มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อความเข้มข้นของซิลเวอร์นาโนเพิ่มขึ้น และโครงสร้างแบบเดนไดรต์นี้จะเกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อเมื่อซิลเวอร์ไอออนมีปริมาณลดน้อยลง ซึ่งในงานวิจัยนี้กล่าวว่าซิลเวอร์นาโนที่มีโครงสร้างแบบเดนไดรต์เป็นผลมาจากพลังงานของรังสีไมโครเวฟและ PVP [10] แสดงด้วยรูปที่ 2.26



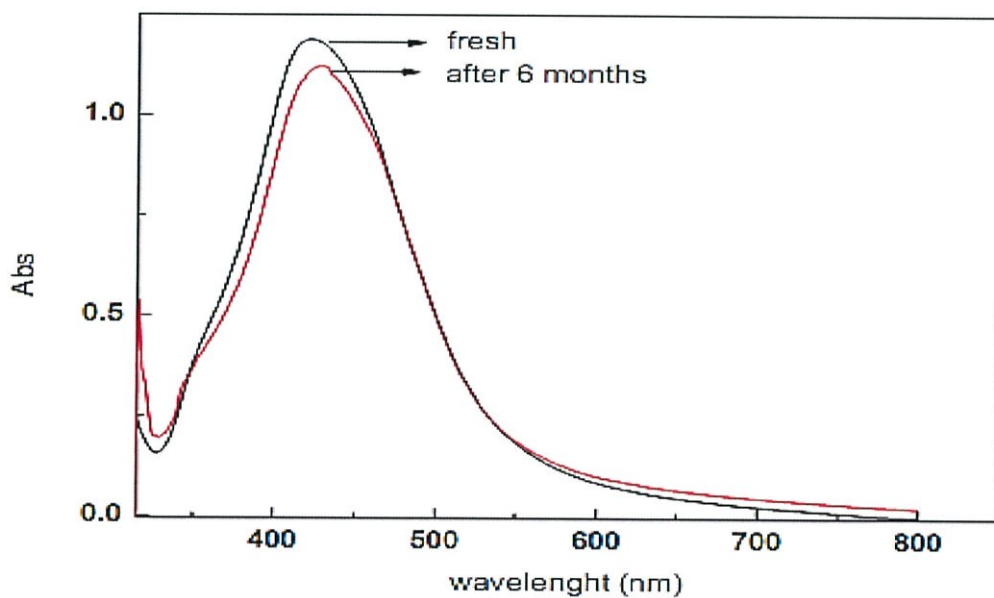
รูปที่ 2.22 กราฟสเปกตรัม UV-Visible ของซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการฉายรังสีไมโครเวฟกับซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม [10]



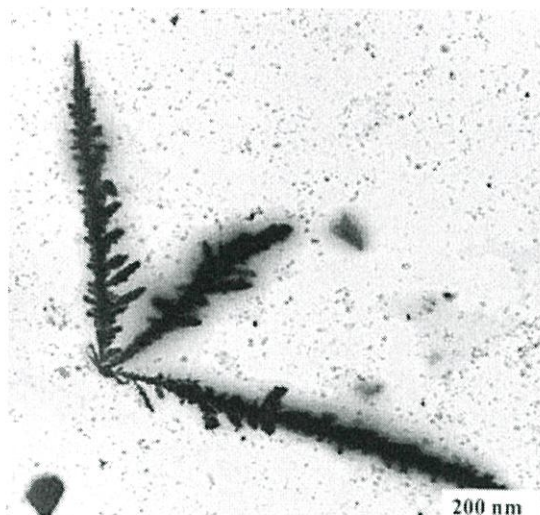
รูปที่ 2.23 ภาพ TEM ของซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม [10]



รูปที่ 2.24 ภาพ TEM ของซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการฉายรังสีไมโครเวฟ [10]



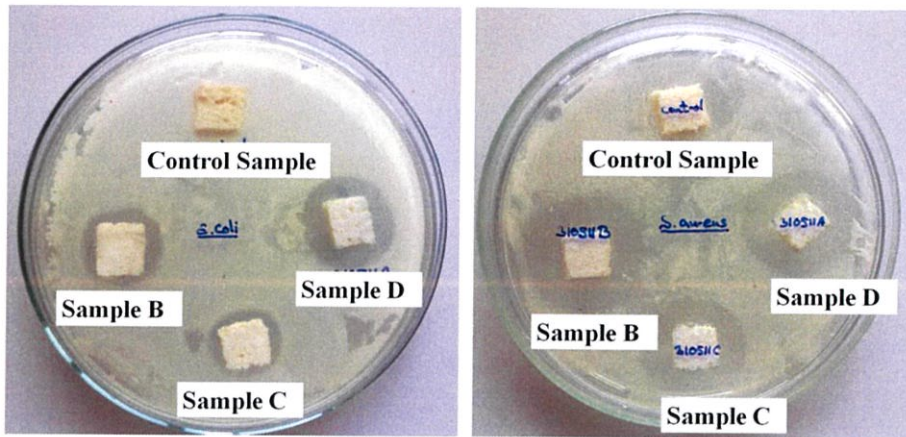
รูปที่ 2.25 กราฟสเปกตรัม UV-Visible ของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่เพิ่งสังเคราะห์และสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่เก็บไว้เป็นเวลา 6 เดือน [10]



รูปที่ 2.26 ภาพ TEM ของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ฉายรังสีไมโครเวฟเป็นเวลา 90 วินาที ซึ่งจะมีการเกิดโครงสร้างแบบเดนไดรต์ [10]

2.7.7 Enhancement of the Antibacterial Activity of Natural Rubber Latex Foam by the Incorporation of Zinc Oxide Nanoparticles

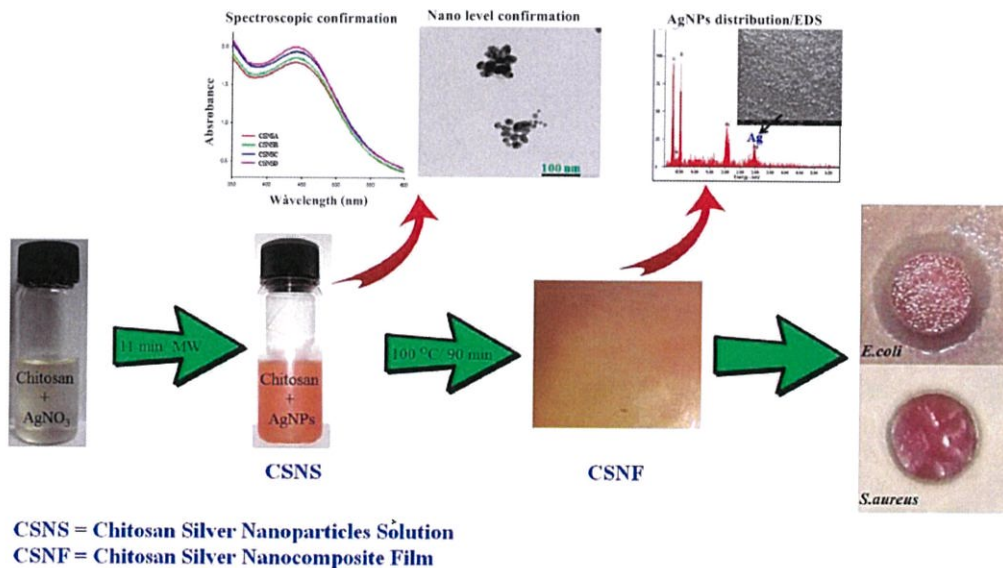
W. G. I. U. Rathnayake et al. ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้แก่โฟมยางธรรมชาติโดยใช้ซิงค์ออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตร ซึ่งใช้วิธีการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติแบบ Dunlop method แล้วนำโฟมยางที่ได้ไปทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบคือ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และ *Escherichia coli* (*E. coli*) ตามลำดับ และจากการศึกษาพบว่าในสภาวะภายใต้แสงยูวี ZnO สามารถสร้างความเป็นพิษให้แก่เชื้อ *Escherichia coli* ได้เป็นอย่างดี รวมถึงความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตรก็มีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Escherichia coli* ด้วย และพบว่าซิงค์ออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตรยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Staphylococcus aureus* ได้เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 2.27 ในกลุ่มโลหะออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตร ได้แก่ ZnO และ TiO₂ เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีแสงเกิดผลิตภัณฑ์ได้ 3 ประเภท ได้แก่ called superoxide radicals hydroxyl radicals และ singlet oxygens และยังมีรายงานว่า ZnO อนุภาคระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงทำให้มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะปลดปล่อยไอออน Zn²⁺ ส่งผลให้สร้างความเป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรีย โดยจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ขึ้น [36]



รูปที่ 2.27 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยจะทดสอบกับเชื้อ *Escherichia coli* (ซ้าย) และเชื้อ *Staphylococcus aureus* (ขวา) [36]

2.7.8 Microwave assisted antibacterial chitosan–silver nanocomposite films

Gownolla Malegowd Raghavendra et al. ได้ทำการศึกษาทดลองการเตรียมฟิล์มนาโนคอมโพสิตระหว่างไคโตซานผสมกับซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งการทดลอง จะนำซิลเวอร์ไนเตรทผสมกับสารละลายไคโตซานในกรดอะซิติกเข้มข้น 2.0 v/v% แล้วนำเข้าไมโครเวฟที่กำลัง 800 วัตต์และฉายคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 11 วินาที ซึ่งไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์แล้วคลื่นไมโครเวฟจะทำให้อนุภาคแตกตัวส่งผลให้อนุภาคซิลเวอร์มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำมาเทขึ้นรูปในงานเพาะเชื้อ แล้วนำไปทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยทดสอบกับเชื้อ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และ *Escherichia coli* (*E. coli*) แสดงดังรูปที่ 2.28 [37]



CSNS = Chitosan Silver Nanoparticles Solution
 CSNF = Chitosan Silver Nanocomposite Film

รูปที่ 2.28 การสังเคราะห์ฟิล์มนาโนคอมโพสิตระหว่างไคโตซานผสมกับซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร และผลการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย [37]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. น้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้น (Concentrated natural rubber latex; NRL) (60% dry rubber content, high-ammonia)
2. ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate; AgNO₃) (Merck-chemicals, Analysis)
3. พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP) (Sigma-aldrich, \bar{M}_w 40,000)
4. สารละลายแอมโมเนีย (Ammonium hydroxide; NH₄OH) (CARLO ERBA, 30% w/v)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. กระบอกตวง
2. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL
3. ปีกเกอร์
4. ซ้อนตักสาร
5. จานเพาะเชื้อ (Petri dish) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm.
6. ขวดเก็บสารตัวอย่าง
7. กรวยกรอง
8. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (New Classic MF; ML204, Mettler Toiedo)
9. ไมโครปิเปต (LE-1000, NICHIRYO)
10. ถ้วยแก้ว

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องกวนแม่เหล็กแบบใช้ความร้อน (hotplate stirrer) (HTS-1003, HARMONY)
2. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล (UV spectrophotometer) (Evolution 201, Thermo Scient)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) (TECNAI 20, TWIN)
4. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer (XRD) (D8 Advance, Bruker AXS)
5. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) (NICOLET 6700, Thermo scientific)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) (EVO MA10, ZEISS)
7. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing instrument) (LR5K, LLOYD instruments)

8. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer) (Pyris 1 TGA, Perkin)
9. เครื่องไมโครเวฟกำลังไฟ 800 วัตต์ (MGZ3F301EA5, SAMSUNG)
10. เครื่อง Fourier Transform Raman Spectrometer (FT-Raman) (รุ่น 2000, Perkin-Elmer)

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียม Stock solution ของสารละลายซิลเวอร์ผสม PVP

1. ชั่ง PVP จำนวน 1.20 กรัมใส่ลงในปิกรเกอร์ขนาด 100 mL
2. เติมน้ำกลั่นลงไป 50.00 mL
3. ปั่นกวนด้วยเครื่องแม่เหล็กปั่นกวนเป็นเวลา 3 นาที จนกระทั่ง PVP ละลายทั้งหมด
4. เติม AgNO_3 จำนวน 1.20 กรัมลงไปในการละลาย PVP แล้วปั่นกวนด้วยเครื่องแม่เหล็กปั่นกวนเป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้สารทั้งสองผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
5. ปรับปริมาตรของสารละลายที่เตรียมได้ โดยเทสารละลายใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตรแล้วเขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.4.2 การสังเคราะห์สารแขวนลอยซิลเวอร์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยวิธีไมโครเวฟ

3.4.2.1 การศึกษาผลของเวลา

1. นำสารละลายซิลเวอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 มาปริมาตร 30 mL ใส่ในถ้วยแก้วขนาด 50 mL จากนั้นนำเข้าไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 300 วัตต์ โดยจะฉายคลื่นไมโครเวฟทีละ 15 วินาทีแล้วเปิดตู้อบไมโครเวฟ 10 วินาที พร้อมกับยกถ้วยแก้วออกเพื่อป้องกันการเดือดที่รุนแรง หลังจากนั้นนำถ้วยแก้วใส่เข้าไปในตู้อบไมโครเวฟแล้วทำการฉายคลื่นไมโครเวฟอีกครั้ง ซึ่งจะทำการเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบ 180 วินาที
2. เก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาทีตามลำดับ
4. นำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารแขวนลอยซิลเวอร์ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy และ Transmission electron microscopy (TEM)

3.4.2.2 การศึกษาผลของกำลังในการฉายคลื่นไมโครเวฟ

1. นำสารละลายซิลเวอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 มาปริมาตร 30 mL ใส่ในปิกรเกอร์ขนาด 50 mL จากนั้นนำเข้าไมโครเวฟที่กำลัง 100 วัตต์ โดยจะฉายคลื่นไมโครเวฟทีละ 15 วินาทีแล้วเปิดตู้อบไมโครเวฟ 5 วินาทีเพื่อป้องกันการเดือดที่รุนแรง ซึ่งจะทำการเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบ 120 วินาที
2. เก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 120 วินาที เพื่อนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารแขวนลอยซิลเวอร์ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy

3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับด้านบนอีกครั้ง แต่เปลี่ยนกำลังในการฉายคลื่นไมโครเวฟเป็น 450 วัตต์

3.4.3 การคำนวณน้ำหนักของซิลเวอร์นาโนที่ใช้ในหน่วย mg/mL

1. ชั่งงานเพาะเชื้อ แล้วบันทึกน้ำหนัก
2. ปิเปตสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาตร 1.00 mL ใส่ในงานเพาะเชื้อ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนแห้ง จากนั้นนำงานเพาะเชื้อออกจากตู้อบพักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. นำไปชั่งหาน้ำหนักที่เหลือ แล้วนำมาลบกับน้ำหนักของงานเพาะเชื้อที่บันทึกไว้ในตอนแรก โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.4.4 การเตรียมคอมโพสิตของแผ่นยางธรรมชาติ

1. ปิเปตสารละลายแอมโมเนีย (NH_4OH) เข้มข้นปริมาตร 0.50 mL และสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนจำนวน 5 ปริมาตรคือ 0 0.10 0.50 1.00 และ 2.00 mL (ตัวอย่างชื่อ B1, B2, B3, B4, และ B5 ตามลำดับ) ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 mL แล้วปั่นกวนด้วย เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
2. ตวงน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้นมา 5.00 mL เทใส่ลงในสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนผสมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นที่เตรียมไว้ แล้วปั่นกวนด้วยเครื่องแม่เหล็กปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
3. เทน้ำยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนซิลเวอร์นาโนลงในงานเพาะเชื้อแล้วทิ้งเป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
5. แกะแผ่นยางตัวอย่างที่แห้งแล้วออกจากงานเพาะเชื้อ เพื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิค XRD, SEM, EDX, FTIR, Raman, TGA, สมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนจากสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนเป็นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทและสารละลาย PVP (ตัวอย่างชื่อ B6 และ B7) ตามลำดับ ซึ่งปริมาณที่ใช้ทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนการเตรียมคอมโพสิตของแผ่นยางธรรมชาติ

ชื่อตัวอย่าง	สัดส่วนการผสม				
	สารละลาย แอมโมเนีย เข้มข้น (mL)	สารแขวนลอย ซิลเวอร์นาโน (mL)	สารละลายซิล เวอร์ไนเตรท (mL)	สารละลาย PVP (mL)	น้ำยาง ธรรมชาติ (mL)
B1	0.50	-	-	-	5.00
B2	0.50	0.10	-	-	5.00
B3	0.50	0.50	-	-	5.00
B4	0.50	1.00	-	-	5.00
B5	0.50	2.00	-	-	5.00
B6	0.50	-	2.00	-	5.00
B7	0.50	-	-	2.00	5.00

* หมายถึง ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเข้มข้น 0.07 mol/L และใช้สารละลาย PVP
เข้มข้น 3×10^{-4} mol/L

3.4.5 การศึกษาด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy

เพื่อศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิสิเบิล ของสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน ซึ่งใช้การดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร จากนั้นจะทำการประมวลผลค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่น เพื่อยืนยันสมบัติความเป็นนาโนของสารแขวนลอยซิลเวอร์ที่เตรียมขึ้นมา

3.4.6 การศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope (TEM)

เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (morphology) , โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของอนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตรที่เตรียมขึ้นมา

3.4.7 การศึกษาด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

เพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ พิสูจน์หรือหาองค์ประกอบของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน ซึ่งใช้หลักการตรวจสอบโดยวัดเทียบสเปกตรัมการกระเจิงแสงแบบรามาน (Raman Light Scattering) ของตัวอย่างที่เตรียมขึ้นกับสเปกตรัมของสารมาตรฐานที่ได้บันทึกไว้หรือที่มีอยู่แล้วใน Library ของฐานข้อมูล

3.4.8 การศึกษาด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เพื่อศึกษาการดูดกลืนอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} ในโหมด transmittance โดยในการทดสอบนั้นจะใช้ตัวอย่างเป็นแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน แล้ววิเคราะห์พีกที่เกิดขึ้นว่าตรงกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติและซิลเวอร์หรือไม่

3.4.9 การศึกษาด้วยเทคนิค X-ray diffraction analysis (XRD)

เพื่อวิเคราะห์ลักษณะผลึกของแผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนว่ามีลักษณะของพีกที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของซิลเวอร์ ตาม JCPDS No.04-0783 หรือไม่

3.4.10 การศึกษาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

เพื่อทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน

3.4.11 การศึกษาด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

เพื่อทำการศึกษาวิเคราะห์สัดส่วนอะตอมของธาตุที่ผสมในแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน ได้แก่ ซิลเวอร์ (Ag) คาร์บอน (C) และ ออกซิเจน (O) ซึ่งจะใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 3 ตัวอย่างได้แก่ แผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางคอมพอสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรปริมาณ 0.50 และ 2.00 mL ตามลำดับ

3.4.12 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric and Derivative Thermogravimetric Analysis (TGA/DTG)

เพื่อทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน เมื่อได้รับความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นและเกิดการสลายตัว

3.4.13 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิค Universal testing machine (UTM)

เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน ซึ่งเตรียมชิ้นงานตัวอย่างขนาด 1×7 เซนติเมตร (กว้าง×ยาว) แล้วนำไปทดสอบโดยใช้แรงดึง 1000 นิวตัน ด้วยเครื่อง Universal testing instrument แล้วคำนวณค่าความต้านทานต่อการเสียรูปหรือค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดของชิ้นงานตัวอย่าง (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)

3.4.14 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

เพื่อทำการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของตัวอย่างแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน แผ่นยางธรรมชาติผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทและแผ่นยางธรรมชาติผสมสารละลาย PVP กับแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* (*E. coli*) และแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีมากในสิ่งแวดล้อมแล้ว ก่อให้เกิดโรคกับมนุษย์และสัตว์ การทดสอบจะทำโดยเตรียมแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิต ขนาด 1×1 cm. (กว้าง×ยาว) แล้วทดสอบด้วยวิธี disc agar diffusion method ซึ่งใช้แบคทีเรียในการทดสอบจำนวน 1×10^8 cfu/mL และศึกษาการเกิด clear zone หรือบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบที่เกิดขึ้นของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิต

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากผลการศึกษานี้สามารถอภิปรายผลการทดลองการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตรด้วยวิธีไมโครเวฟและการเตรียมแผ่นยางคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนได้ดังนี้

4.1 ผลการสังเคราะห์สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตร

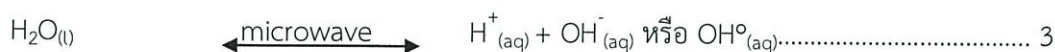
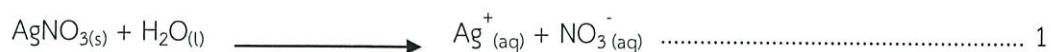
จากการสังเคราะห์สารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร โดยวิธีไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์ แล้วเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาการฉายคลื่นไมโครเวฟ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาทีตามลำดับ โดยจะใช้เวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟทีละ 15 วินาทีแล้วเปิดตู้อบไมโครเวฟ 5 วินาทีเพื่อป้องกันการเดือดที่รุนแรง ซึ่งจะทำให้เย็นไปเรื่อยๆจนครบ 180 วินาที พบว่าสีของสารจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายใสไม่มีสีเป็นสารแขวนลอยสีเหลืองและสีเหลืองส้มตามลำดับ เมื่อใช้ระยะเวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร เมื่อใช้ระยะเวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟ 0, 90, 120, 150 และ 180 วินาทีตามลำดับ

ซึ่งจากการเปลี่ยนสีดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า อนุภาคซิลเวอร์นั้นเมื่อทำให้มีขนาดเล็กลงมากๆ จนถึงระดับนาโนเมตรจะแสดงสมบัติเชิงแสงหรือปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า Surface Plasmon Resonance (SPR) ขึ้น [23] โดย อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่บริเวณผิวจะมีการสั่นที่พร้อมเพียงกันทำให้เกิดเป็นคลื่นที่มีความหนาแน่นของประจุขึ้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบกับอนุภาคจึงเกิดการกระเจิงของแสงขึ้นและมีแสงบางส่วนถูกดูดกลืนแล้วเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น ส่งผลให้เกิดเป็นสีที่ตรงกับคลื่นที่ถูกดูดกลืนไว้ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคด้วย โดยสีเหลืองนั้นเป็นสีเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตรรูปร่างทรงกลม

กลไกการเกิดซิลเวอร์นาโนที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเวฟ



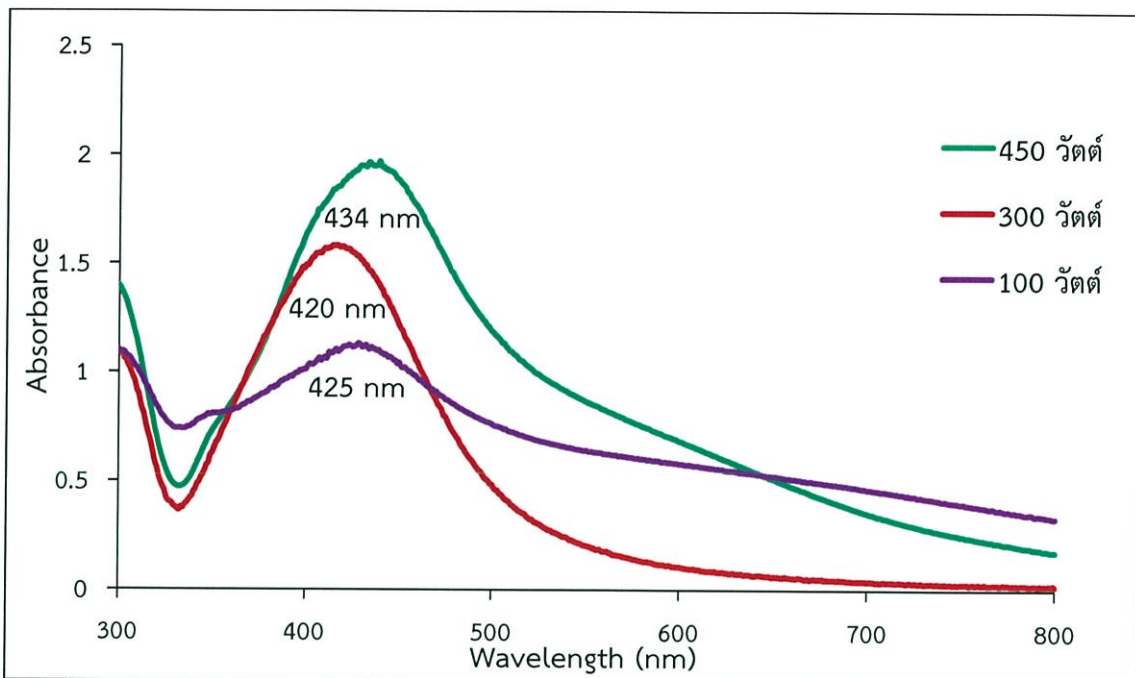
เมื่อซิลเวอร์ไนเตรทถูกทำละลายในน้ำ จะเกิดการแตกตัวได้เป็นซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) โดยซิลเวอร์ไอออนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับธาตุออกซิเจนที่หมู่คาร์บอนิลของ PVP ซึ่งเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนที่ไม่เกิดพันธะ และซิลเวอร์ไอออนจะถูกรีดิวซ์โดย OH^- หรือ OH° ที่มาจากการแตกตัวของน้ำเมื่อฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟ เกิดเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน Ag^0 ขึ้น

4.1.1 ผลการวิเคราะห์สารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy

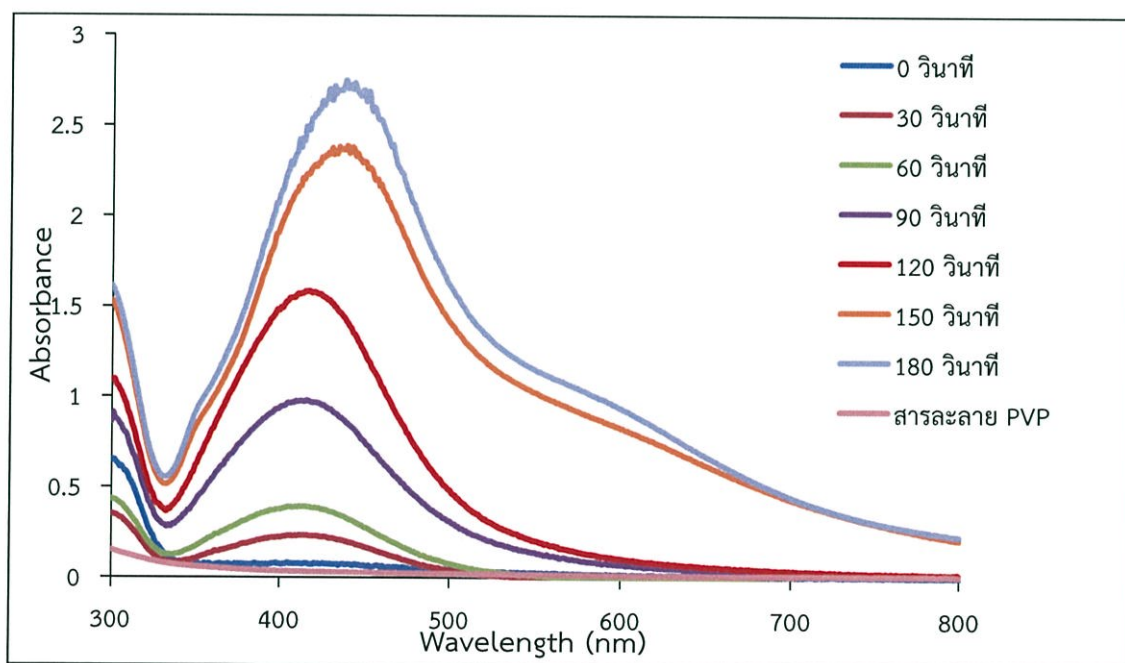
จากการศึกษาผลของกำลังในการฉายคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 100 300 และ 450 วัตต์ เป็นเวลา 120 วินาที แล้วนำสารแขวนลอยซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อยืนยันว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็นสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรหรือไม่ โดยใช้เทคนิค UV-Visible Spectroscopy ซึ่งใช้ช่วงการดูดกลืนของแสงยูวีที่ 300 ถึง 800 นาโนเมตร พบว่าเมื่อใช้กำลังในการฉายคลื่นไมโครเวฟ 100 วัตต์สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ได้จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำกว่าการฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 300 และ 450 วัตต์ เนื่องจากที่กำลัง 100 วัตต์นั้นทำให้น้ำซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายเกิดการแตกตัวเป็น H^+ และ OH^- หรือ OH° ได้น้อย จึงทำให้ OH° ที่เกิดขึ้นนั้นไปรีดิวซ์ Ag^+ แล้วได้ Ag^0 ในปริมาณที่น้อย และยังพบว่าเมื่อฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 450 วัตต์นั้นทำให้น้ำซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายเกิดการแตกตัวเป็น H^+ และ OH^- หรือ OH° ได้มาก จึงเกิดการรีดิวซ์ Ag^+ แล้วได้ Ag^0 ในปริมาณที่มาก ทำให้เมื่อนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงยูวีจะพบว่ามีการดูดกลืนแสงยูวีที่สูงกว่าการฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 100 และ 300 วัตต์ แต่ในขณะเดียวกันยังพบว่าการฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟในกำลังวัตต์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลในการแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีค่าความยาวคลื่นสูงสุดเพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 4.2 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก PVP ซึ่งใช้เป็นตัวรักษาความเสถียรหรือป้องกันการเกาะตัวกันของอนุภาคนั้นเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งคุณสมบัติของพอลิเมอร์นั้นไม่ทนต่ออุณหภูมิที่สูงมากนัก เมื่อ PVP ได้รับความร้อนจากการฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟ อาจทำให้ PVP บางส่วนเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นได้ จึงทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการจับตัวกันขึ้น

จากนั้นเมื่อศึกษาผลของเวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์เป็นเวลา 0 30 60 90 120 150 และ 180 วินาทีตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีค่าการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นสูงสุด

เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเกิดอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้นแต่อนุภาคที่เกิดขึ้นเกิดการจับตัวกันของอนุภาค ซึ่งอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของ PVP ในบางส่วน แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม UV-Visible ของสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อฉายคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 100, 300 และ 450 วัตต์ เป็นเวลา 120 วินาที ตามลำดับ

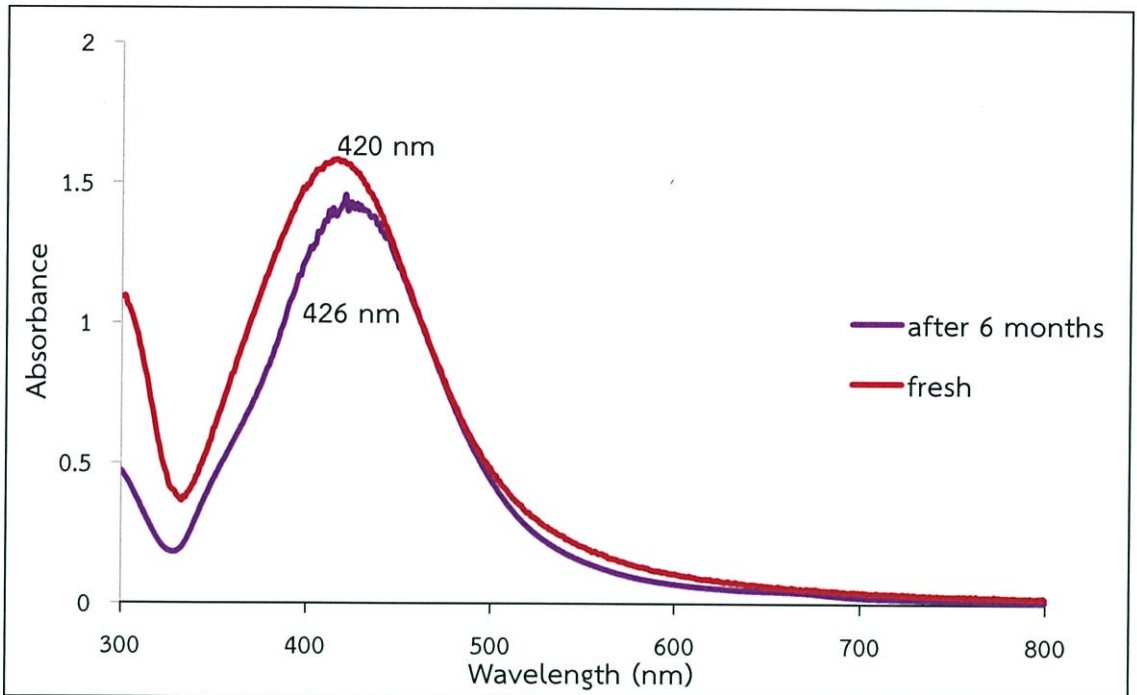


รูปที่ 4.3 สเปกตรัม UV-Visible ของ PVP และสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อฉายคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์ เป็นเวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นของสารแขวนลอยซิลเวอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์

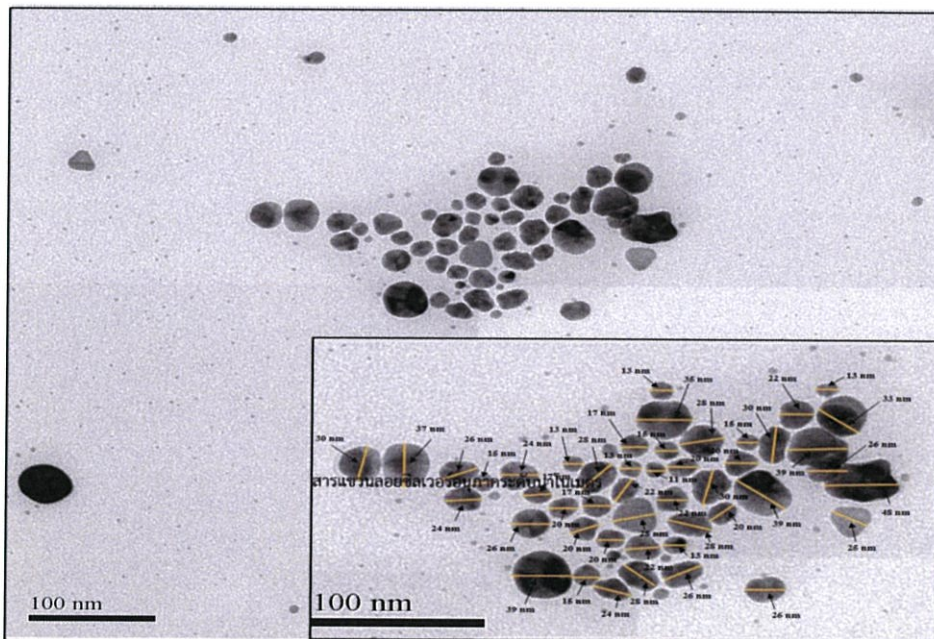
ระยะเวลาในการฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟ (วินาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (Wavelength) nm
0	-	-
30	0.23	413
60	0.39	415
90	0.98	418
120	1.55	420
150	2.35	438
180	2.70	443

ดังนั้นจากรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะพบว่าสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลัง 300 วัตต์เป็นเวลา 120 วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคขนาดระดับนาโนเมตรมากที่สุด เนื่องจากได้ปริมาณซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่มากและมีขนาดที่สม่ำเสมอ โดยเปรียบเทียบจากค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นสูงสุด ระหว่างช่วงเวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟ 0 ถึง 120 วินาทีซึ่งมีค่าความยาวคลื่นสูงสุดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบระบบเปิด จึงพบว่าเมื่อฉายด้วยคลื่นที่ช่วงเวลามากกว่า 120 วินาทีนั้น จะเกิดการสูญเสียตัวทำละลายในปริมาณที่มากเนื่องจากการสั่นที่รุนแรงของไมเลกุลทำให้ยากต่อการควบคุม และอนุภาคที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ โดยดูจากรูปที่ 4.3 พบว่ากราฟสเปกตรัมของช่วงเวลาการฉายคลื่นไมโครเวฟ 150 และ 180 วินาทีนั้นมีค่าการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นสองช่วงและอนุภาคที่เกิดขึ้นนั้นอาจเกาะตัวกันเนื่องจากการเสื่อมสภาพของ PVP และจากรูปที่ 4.4 ยืนยันได้ว่า PVP สามารถใช้เป็นสารรักษาความเสถียรหรือป้องกันการเกาะตัวกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ดี ซึ่งเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าเมื่อเก็บสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ไว้เป็นเวลา 6 เดือน แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงยูวีเทียบกับการแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่เพิ่งสังเคราะห์เสร็จใหม่ๆ จะพบการเปลี่ยนแปลงของพีคที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

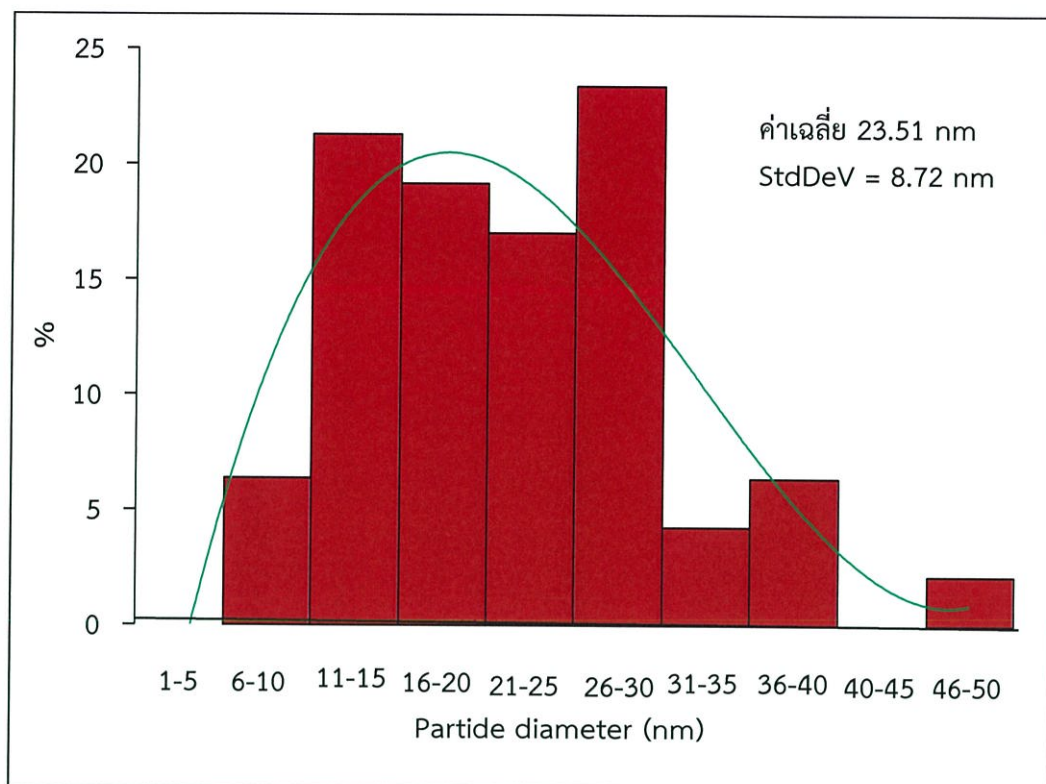


รูปที่ 4.4 สเปกตรัม UV-Visible ของสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อฉายคลื่นไมโครเวฟกำลัง 300 วัตต์ เป็นเวลา 120 วินาที และเก็บสารไว้เป็นเวลา 6 เดือน

4.1.2 ผลการวิเคราะห์สารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope (TEM)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลเวอร์ที่ได้จากสังเคราะห์โดยใช้ PVP เป็นสารรักษาสภาพ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตร

การการศึกษาขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์เป็นเวลา 120 วินาที ซึ่งจะนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าเมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลเวอร์ขนาดระดับนาโนเมตร และจากรูปที่ 4.6 พบว่าอนุภาคซิลเวอร์ที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 23.51 ± 5 นาโนเมตร และอนุภาคมีลักษณะเกาะกลุ่มกันเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากผลของ PVP ที่ใช้ในการป้องกันการเกาะตัวของอนุภาค และยังพบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้นั้นมีรูปร่างเรขาคณิตและมีขนาดที่หลากหลาย

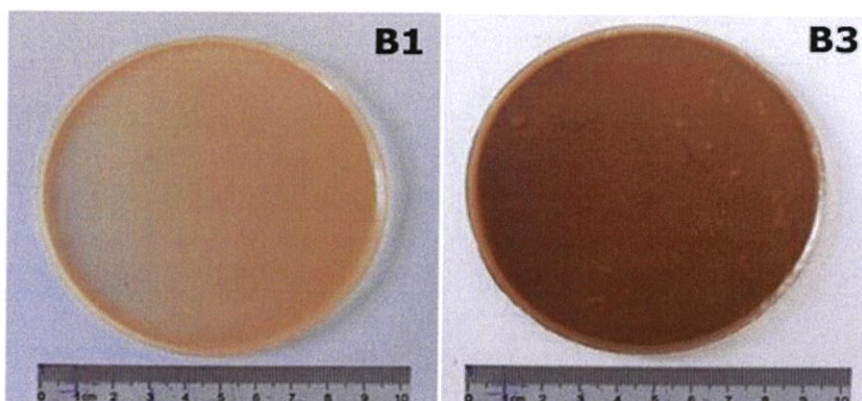
4.2 การเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร

ซึ่งในการเตรียมเป็นแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนนั้นจะใช้สารสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่เตรียมโดยการฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์เป็นเวลา 120 วินาที โดยน้ำหนักของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่อยู่ในสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่ใช้ผสมลงในยางธรรมชาติจะมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 0.0291 g/mL หรือ 29.10 mg/mL ซึ่งการคำนวณหาปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนนั้นจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การคำนวณน้ำหนักของซิลเวอร์นาโนที่ใช้ในหน่วย mg/mL

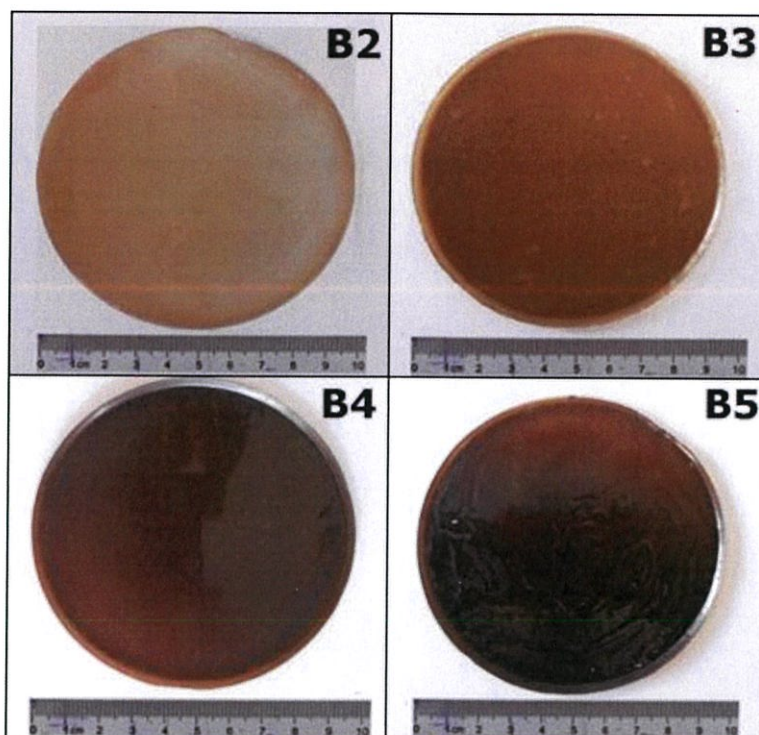
ครั้งที่	น้ำหนักงานเพาะเชื้อ (g)	น้ำหนักหลังอบของงานเพาะเชื้อ + สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน (g)	น้ำหนักของอนุภาค ซิลเวอร์นาโน (g)
1	41.6267	41.6556	0.0289
2	50.8472	50.8757	0.0285
3	45.0758	45.1056	0.0298
น้ำหนักเฉลี่ย (g)			0.0291

ในการเตรียมแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร โดยวิธีการผสมโดยตรงที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองพบว่าแผ่นยางธรรมชาติจะมีลักษณะสีขาวเหลือง และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรจะมีสีน้ำตาล แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรมีการกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติได้ดี เนื่องจากอนุภาคของยางธรรมชาติจะมีโมเลกุลของโปรตีนและฟอสโฟลิปิดซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วล้อมรอบอยู่ [11] เมื่อผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนลงไปจึงทำให้สามารถกระจายตัวเข้ากันได้ดีในยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.7 ลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางคอมโพสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรปริมาตร 0.50 mL (B3)

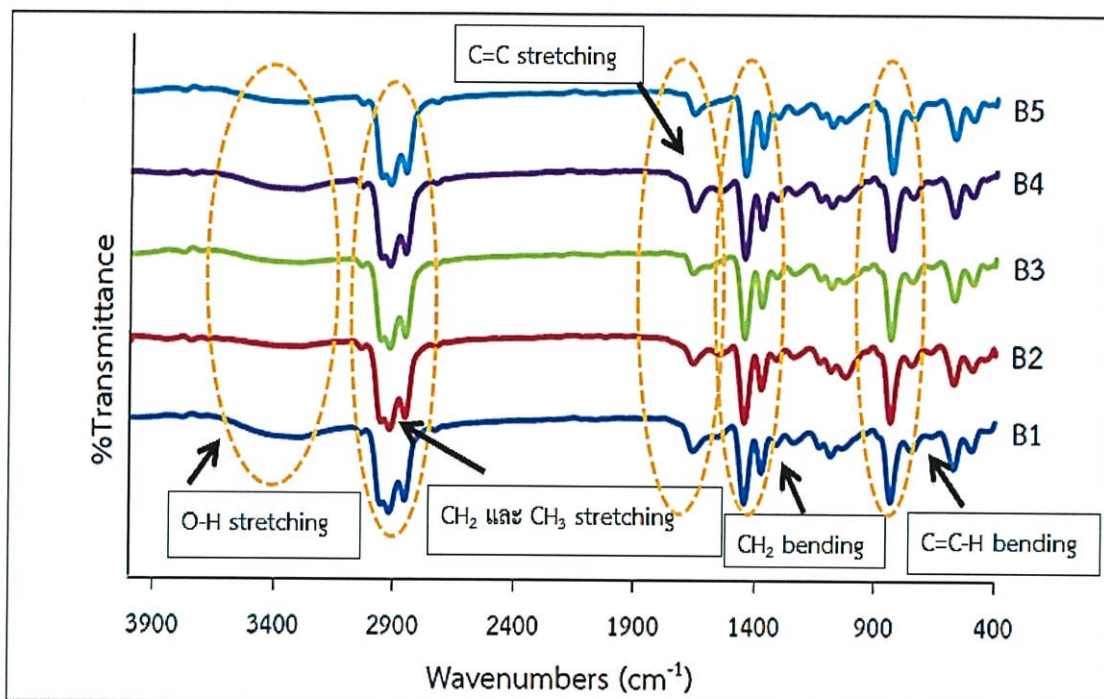
จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรที่ปริมาตรต่างๆ ได้แก่ 0.10 0.50 1.00 และ 2.00 mL ดังตัวอย่าง B2 B3 B4 และ B5 ตามลำดับ พบว่าแผ่นยางคอมโพสิตที่เตรียมได้จะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อใช้ปริมาตรของสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรในปริมาณที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะของแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรที่ปริมาณต่างๆ

4.2.1 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางคอมโพสิตด้วยเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy

จากการศึกษาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรในปริมาตรต่างๆ ได้แก่ 0.10 0.50 1.00 และ 2.00 mL ดังตัวอย่าง B1 B2 B3 B4 และ B5 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากตรวจวัดด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy เพื่อให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบางส่วนได้ และทำให้ทราบว่าสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรมีผลทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ ซึ่งสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค FTIR นี้สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันได้จากพีคที่เกิดขึ้น พีคที่ตำแหน่ง $3100-3600\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีของ O-H Stretching พีคที่ตำแหน่ง 2960 และ 2855 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีของ C-H Stretching ($-\text{CH}_3$ และ $-\text{CH}_2$) ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 1667 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีของ C=C ซึ่งจากสเปกตรัมที่เกิดขึ้นสามารถบอกได้ว่าลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีของ C-H Stretching และ C=C เป็นองค์ประกอบทางโครงสร้างของแผ่นยางธรรมชาติ ส่วนลักษณะการสั่นพันธะทางเคมีของ O-H Stretching เป็นองค์ประกอบทางโครงสร้างของน้ำหรือความชื้นในอากาศที่ผสมอยู่ภายในเนื้อแผ่นยางธรรมชาติ และสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้นี้ยังสามารถยืนยันได้ว่า การเติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน (B2 B3 B4 และ B5) ลงไปในน้ำยางธรรมชาตินั้นส่งผลให้มีลักษณะการสั่นของพันธะทางเคมีหรือลักษณะทางโครงสร้างไม่แตกต่างไปจากแผ่นยางธรรมชาติ (B1) เนื่องจากมีการเติมลงไปเป็นปริมาณที่น้อยมากๆ ซึ่งค่าการสั่นของหมู่ฟังก์ชันทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.3 [40]

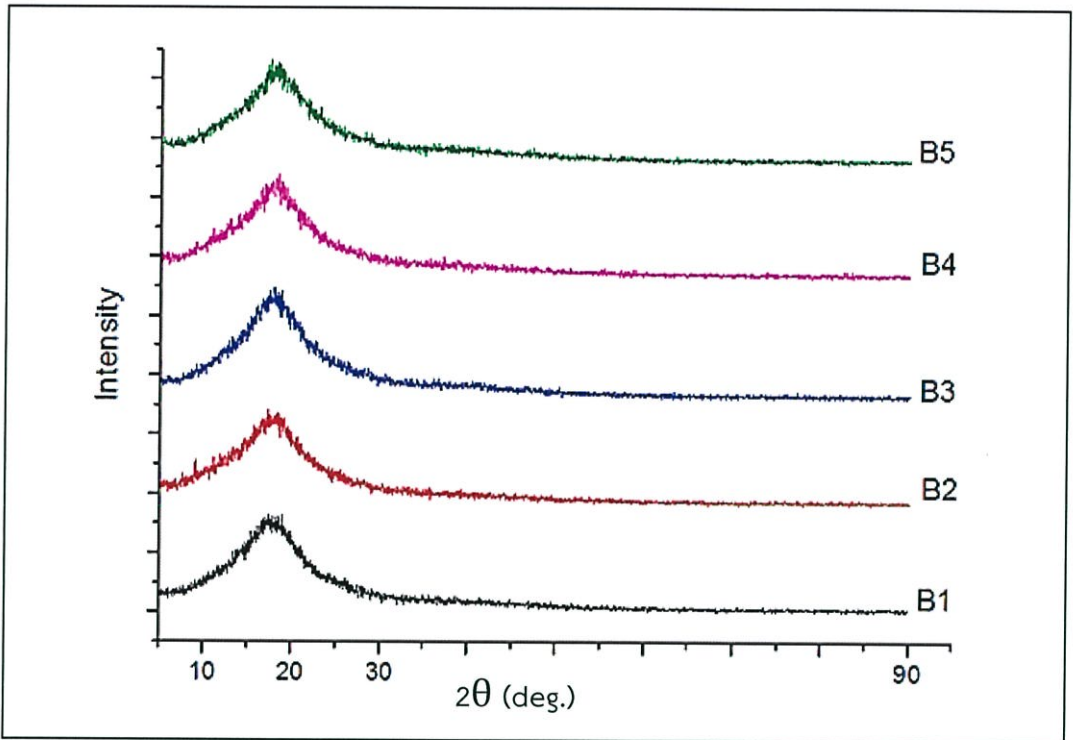


รูปที่ 4.9 สเปกตรัม FTIR ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยดีซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรที่ปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างน้ำยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตร

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่นของแผ่นยางธรรมชาติ (cm ⁻¹)	เลขคลื่นของแผ่นยางคอมโพสิต (cm ⁻¹)
O-H stretching	3100-3600	3100-3600
CH ₃ stretching	2960	2960
CH ₂ asymmetry stretching	2920	2920
CH ₂ symmetry stretching	2855	2855
C=C symmetry stretching	1667	1667
CH ₂ Bending	1447	1447
C-H asymmetry stretching	1376	1376
CH ₂ wagging	1126	1126
C-CH ₂ stretching	1086	1086
C=C-H bending	838	838

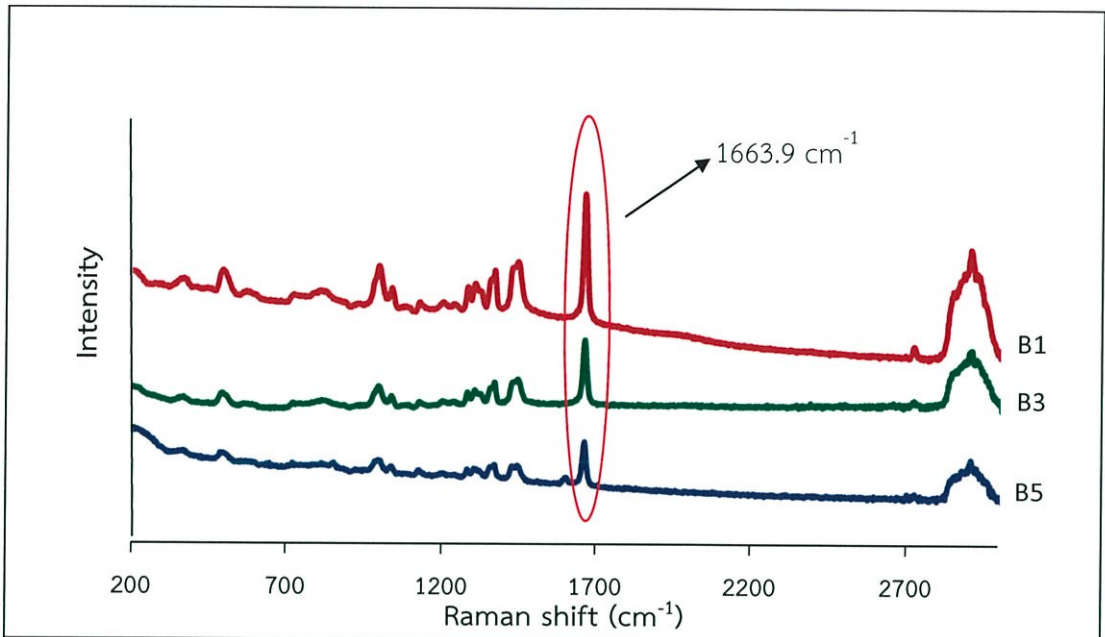
4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction analysis (XRD)



รูปที่ 4.10 สเปกตรัม XRD Pattern ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ (B2 B3 B4 และ B5)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของผลึกที่อยู่ในแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าตัวอย่าง B1 ซึ่งเป็นยางธรรมชาตินั้นมีพีคเด่นเกิดขึ้นที่ค่า 2θ ที่มุม 19 องศา ซึ่งถือเป็นพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างผลึกเป็นอสัณฐาน [38] ส่วนตัวอย่าง B2 B3 B4 และ B5 นั้นมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มีลักษณะคล้ายรูปแบบของยางธรรมชาติ และไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของซิลเวอร์ที่มุม 38 องศาตามที่ควรจะเป็น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไปมีปริมาณที่น้อย จึงไม่ปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นจึงต้องนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่นๆ เพื่อพิสูจน์ว่าในแผ่นยางนั้นมีซิลเวอร์นาโนกระจายตัวอยู่จริง

4.2.3 ผลการวิเคราะห์สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนเมตรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

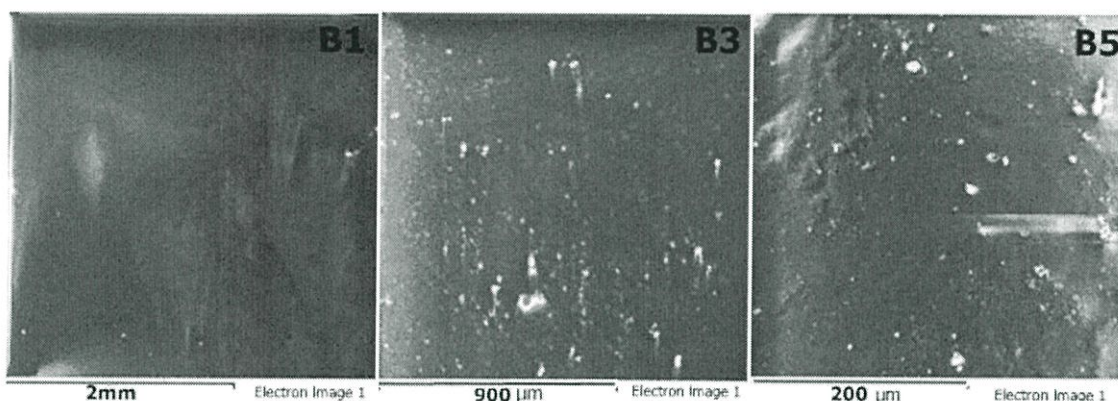


รูปที่ 4.11 สเปกตรัม Raman ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ (B3 และ B5)

จากการทดลองพบว่าการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนเข้าไปในยางธรรมชาติ (B3 และ B5) ส่งผลให้ค่า intensity ของยางธรรมชาติลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโน (B1) ซึ่งพีคค่า intensity ที่วัดได้จากเทคนิครามานสเปกตรัมที่ตำแหน่ง 1663.9 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชันของหมู่ isoprene ที่เป็น C=C ของยางธรรมชาติ และสังเกตได้ว่า พีคค่า intensity นี้ มีค่าลดลงอย่างชัดเจน ($B1 > B3 > B5$) อาจเป็นผลจากการที่เติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไป จึงทำให้เกิด Defect ขึ้นในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติ ซึ่งจะมีผลไปยังการ scattering ของแสงภายในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติด้วย

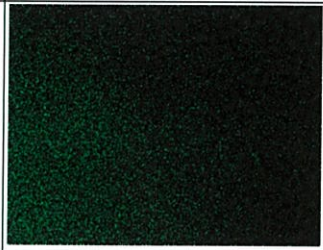
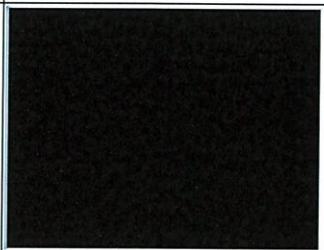
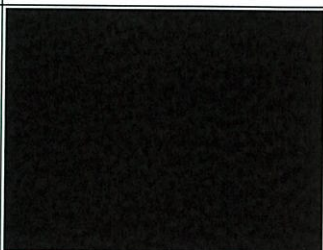

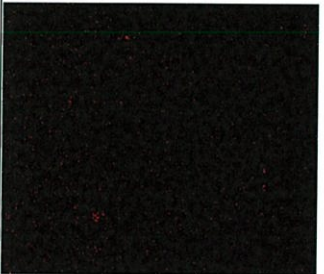

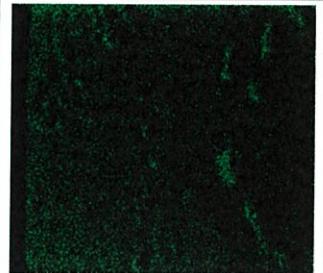
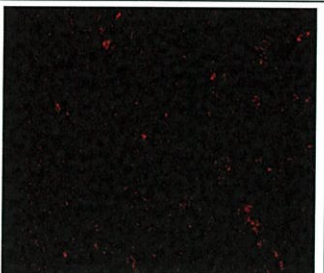
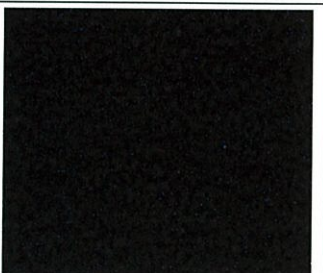
4.2.4 ผลการวิเคราะห์แผ่นยางคอมโพสิตด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray (EDX) spectroscopy

ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX นั้น จะเลือกตัวอย่างมา 3 ตัวอย่างได้แก่ แผ่นยางธรรมชาติ (B1) ยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน 0.50 mL (B3) และยางธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน 2.00 mL (B5) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาค วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุองค์ประกอบรวมถึงการกระจายตัวของธาตุต่างๆในแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิต โดยจะดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากความแตกต่างของปริมาตรสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไป แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า B1 ซึ่งเป็นยางธรรมชาตินั้นมีพื้นผิวที่เรียบและมีความแน่นของอนุภาค แต่เมื่อเติมซิลเวอร์ลงไป (B3 และ B5) พื้นผิวของตัวอย่างจะมีความขรุขระมากขึ้นแปรผันตามปริมาตรซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไป ซึ่งเป็นผลจากการที่อนุภาคซิลเวอร์นาโนเข้าไปกระจายตัวอยู่ในยางธรรมชาติ ซึ่งความขรุขระที่เพิ่มขึ้นนี้คือการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นคอมโพสิตกับเชื้อแบคทีเรียให้มากขึ้น ทำให้แผ่นคอมโพสิตมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีขึ้น

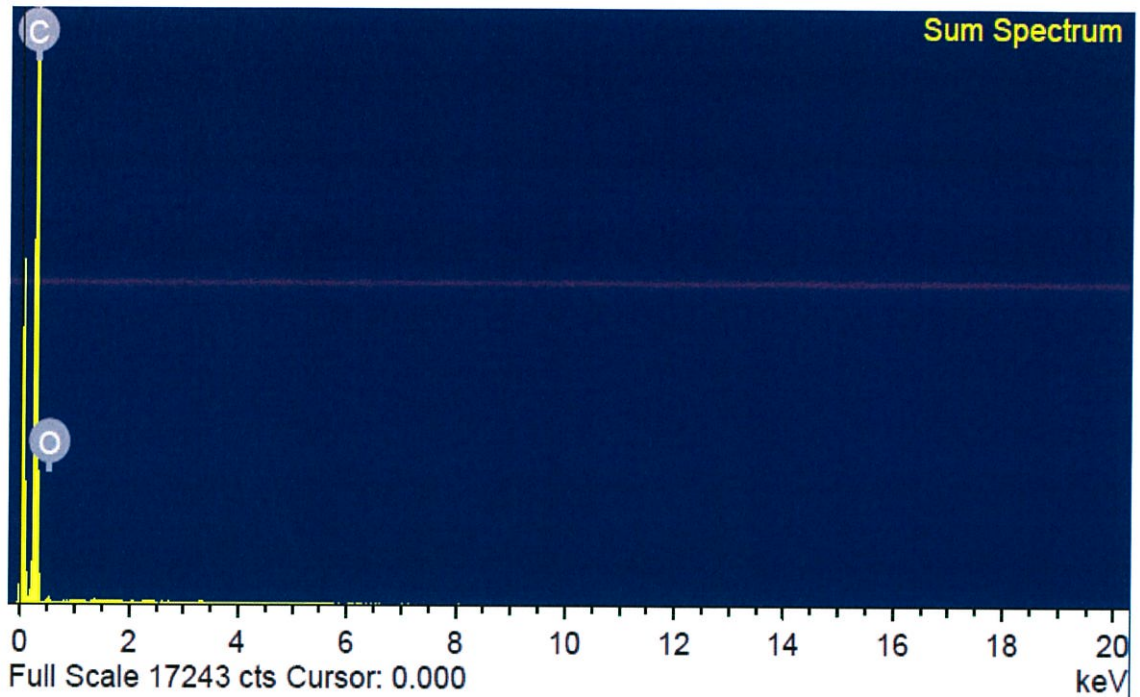


รูปที่ 4.12 ลักษณะ (cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ (B3 และ B5) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

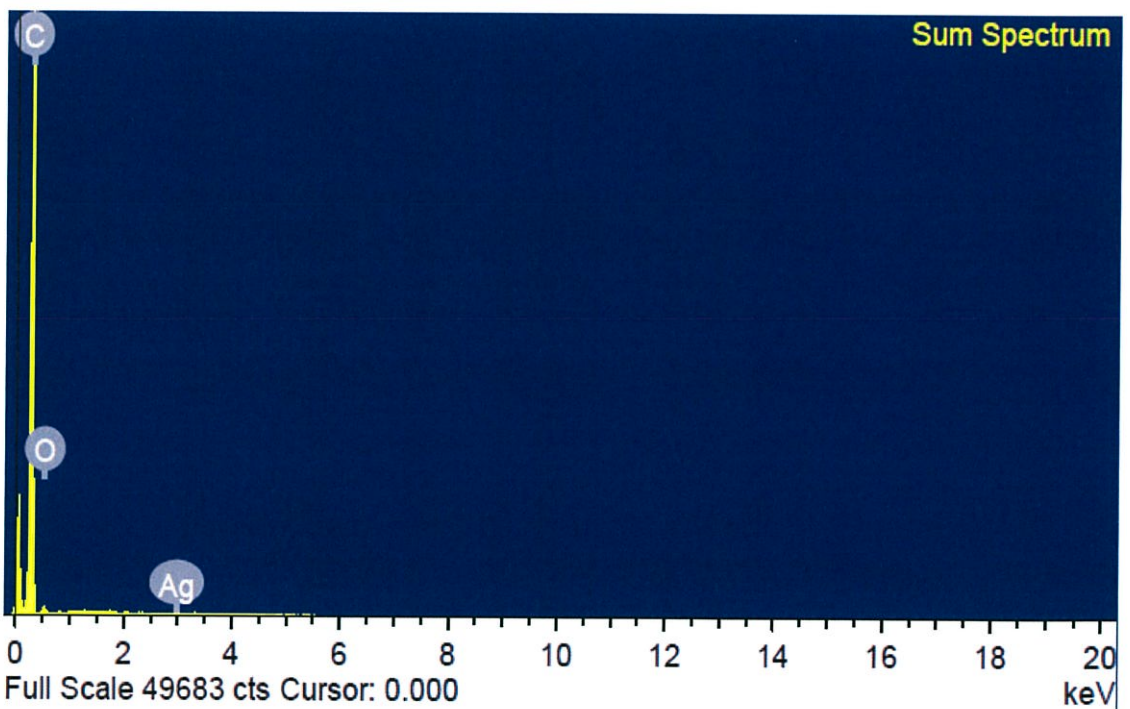
ตารางที่ 4.4 Mapping ของธาตุที่พบบนแผ่นยางธรรมชาติ (B1) และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างน้ำยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 (B3) และ 2.00 mL (B5) วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX

ชื่อตัวอย่าง	Mapping ธาตุที่พบ		
	ธาตุคาร์บอน	ธาตุออกซิเจน	ธาตุซิลเวอร์
B1			
B3			
B5			

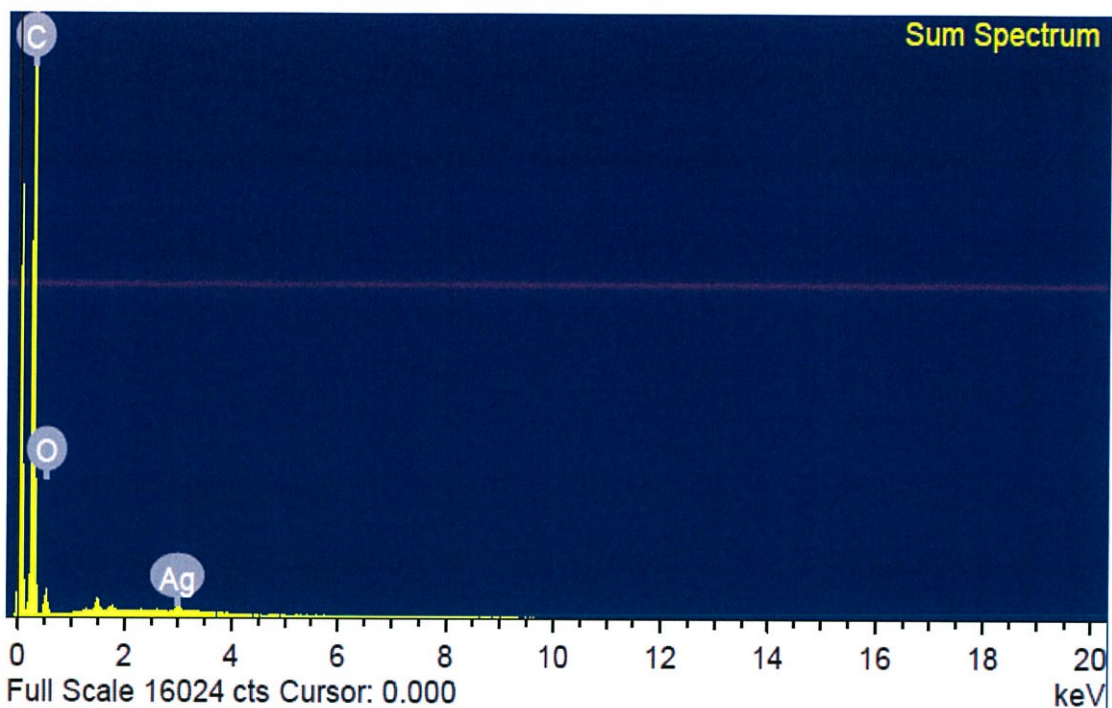
จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าซิลเวอร์นาโนมีการกระจายตัวในแผ่นยางอย่างสม่ำเสมอซึ่งเป็นผลจากการเติม PVP โดยในตัวอย่าง B5 จะมีจุดของซิลเวอร์มากกว่าในตัวอย่าง B3 เนื่องจากมีการเติมซิลเวอร์นาโนลงไปเป็นปริมาณมาก และจากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่าง พบว่าในแผ่นยางธรรมชาติจะมีธาตุคาร์บอนมากที่สุด เนื่องจากธาตุคาร์บอนเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของยางธรรมชาติ และเมื่อเติมซิลเวอร์นาโนมากขึ้นธาตุคาร์บอนจะมีปริมาณลดลง แต่จะมีธาตุออกซิเจนและธาตุซิลเวอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งออกซิเจนนั้นมาจากอากาศหรือน้ำที่ใช้เป็นตัวทำละลายซิลเวอร์ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน ซึ่งธาตุดังกล่าวอาจจะไปดับธาตุคาร์บอนจึงทำให้พบธาตุคาร์บอนในปริมาณที่ลดลง ปริมาณธาตุที่พบแสดงรูปที่ 4.13 4.14 4.15 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเตรียมแผ่นคอมโพสิตของยางกับซิลเวอร์นาโนนั้นเกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีการกระจายตัวของสารเติมแต่งในตัวเมทริกซ์ได้เป็นอย่างดี ทำให้มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเป็นไปอย่างทั่วถึงทั้งแผ่นยางคอมโพสิต



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมธาตุที่พบบนแผ่นยางธรรมชาติ (B1) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมธาตุที่พบบนแผ่นยางคอมโพสิตเมื่อเติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX

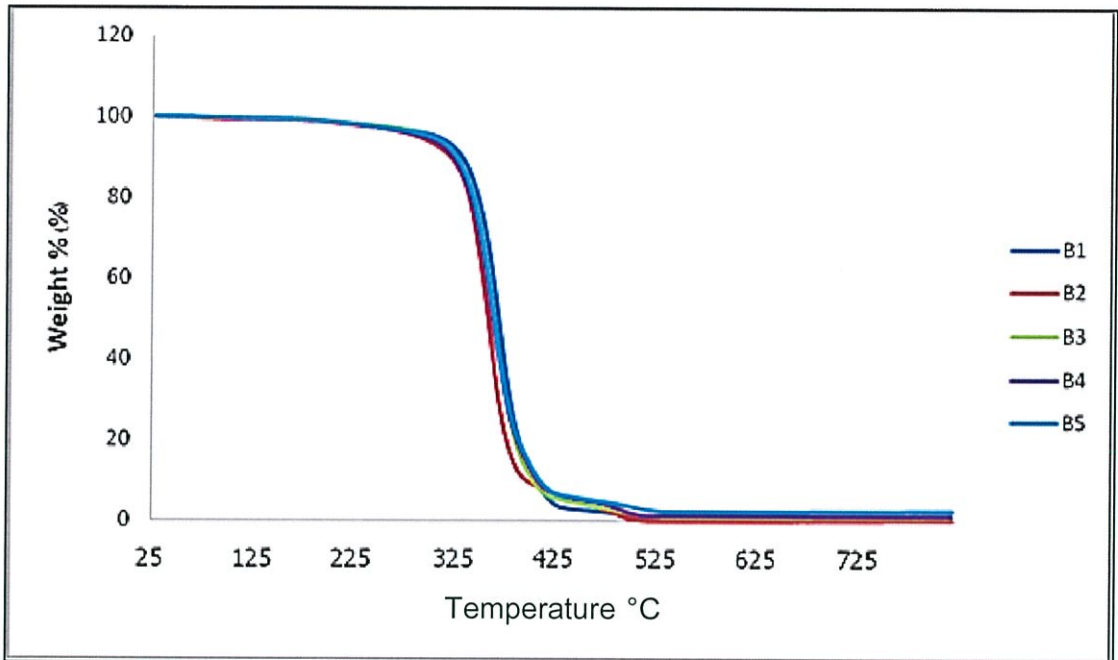


รูปที่ 4.15 สเปกตรัมธาตุที่พบบนแผ่นยางคอมโพสิตเมื่อเติมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 2.00 mL (B5) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX

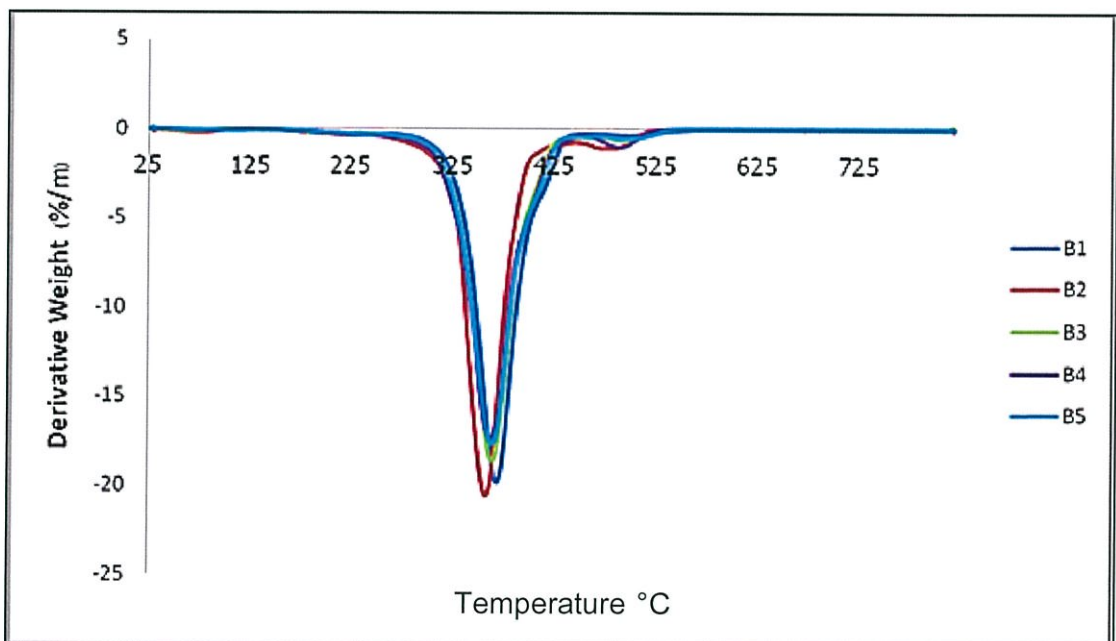
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบในแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิต

ชื่อตัวอย่าง	Weight %			Atomic%		
	C	O	Ag	C	O	Ag
ยางธรรมชาติ	95.58	4.42	-	96.64	3.36	-
ยางธรรมชาติ + สารแขวนลอย ซิลเวอร์นาโน 0.50 mL	95.35	4.59	0.06	96.50	3.49	0.01
ยางธรรมชาติ + สารแขวนลอย ซิลเวอร์นาโน 2.00 mL	86.14	12.86	0.99	89.82	10.07	0.12

4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตด้วยเทคนิค TGA และ DTG



รูปที่ 4.16 กราฟน้ำหนักที่สูญหายไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางคอมโพสิตผสมสารแชนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณปริมาณต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA



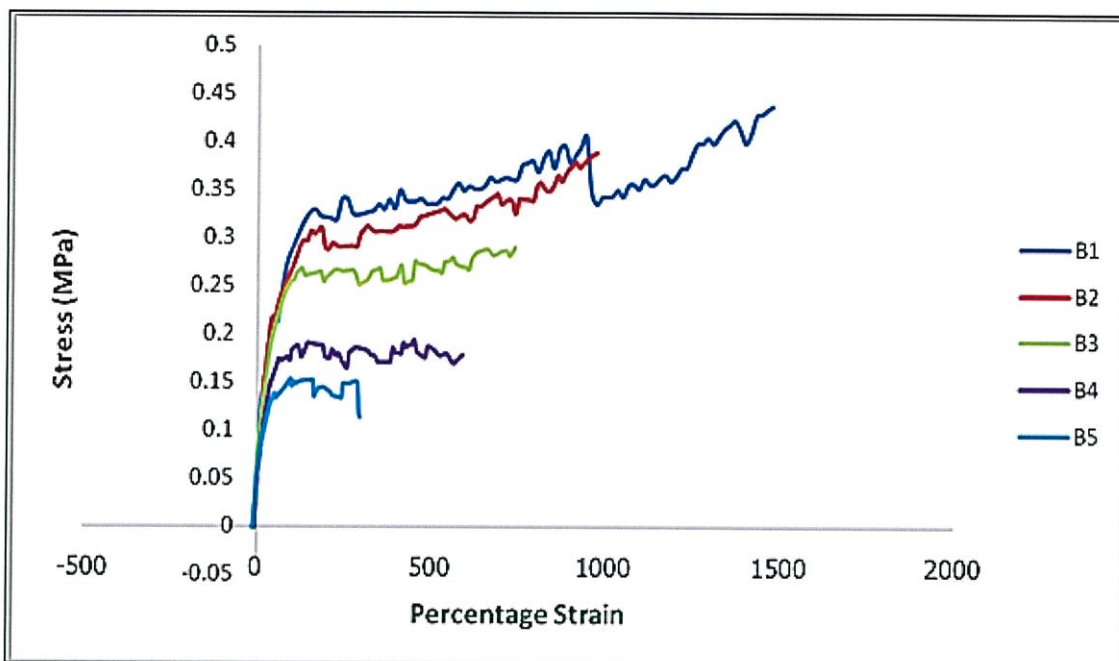
รูปที่ 4.17 กราฟ Derivative Thermo Gravimetric (DTG) ของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางคอมโพสิตผสมสารแชนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณปริมาณต่างๆ

ในการทดสอบนี้จะนำตัวอย่างทั้ง 5 ชนิดไปหาอุณหภูมิการสลายตัวของแต่ละตัวอย่างโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่าตัวอย่างทุกชนิดมีช่วงการสลายตัว 1 ช่วง คือช่วงอุณหภูมิประมาณ 330 ถึง 430 องศาเซลเซียส และมีค่าเปอร์เซ็นต์การสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งลักษณะการสลายตัวนี้คือการสลายตัวของยางธรรมชาติ โดยที่ยางคอมพอสิตที่มีซิลเวอร์นาโนนั้นจะเกิดการสลายตัวเร็วกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่ซิลเวอร์นาโนเข้าไปกระจายตัวอยู่ทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติมี defect เกิดขึ้น จากข้อมูลข้างต้นพบว่าตัวอย่างนั้นไม่ได้สลายตัว 100% ซึ่งส่วนที่เหลืออยู่นั้นอาจเป็นถ้ำหรือเป็นส่วนที่ไม่เกิดการสลายตัว และอาจจะเป็นซิลเวอร์นาโนที่เติมเข้าไป เนื่องจากการทดสอบโดยให้ความร้อนจาก 30–800 องศาเซลเซียส แต่ซิลเวอร์นาโนมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 960 องศาเซลเซียสและมีจุดเดือดถึง 2210 องศาเซลเซียส ดังนั้นการทดสอบด้วยเทคนิค TGA จึงแทบไม่เห็นความแตกต่างในกราฟของแผ่นตัวอย่างแต่ละชนิดเลย และกล่าวได้ว่าซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไปนั้นไม่มีผลในการทำให้แผ่นยางธรรมชาติมีความทนต่อความร้อนมากขึ้น

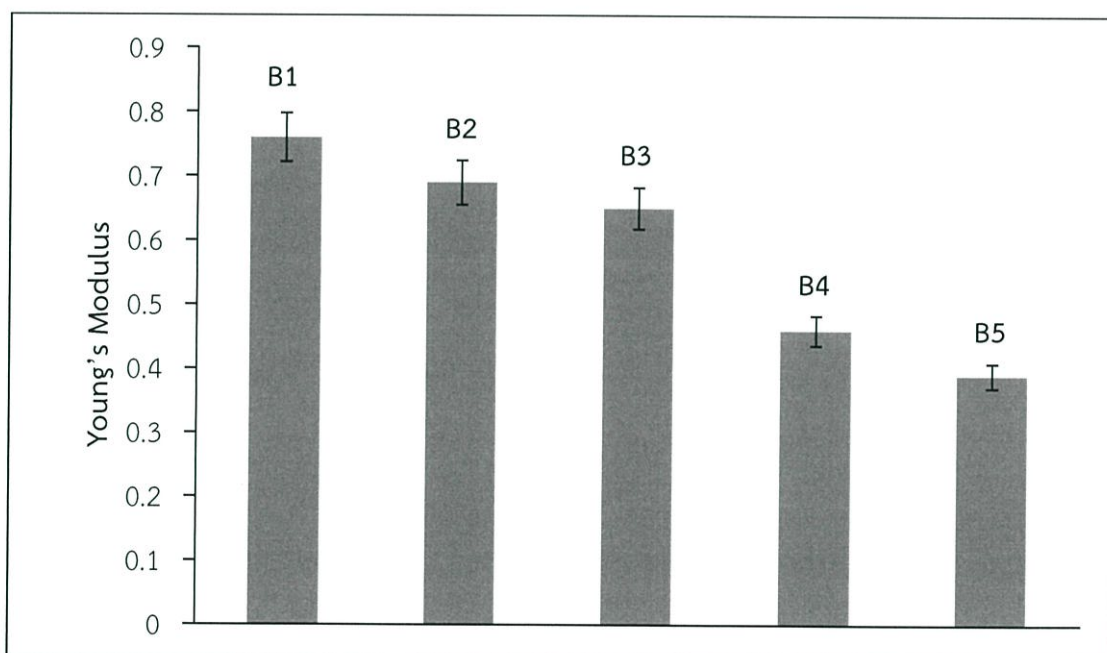
4.2.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมพอสิต

ในการทดสอบนี้จะเตรียมชิ้นงานจากแผ่นคอมพอสิตทั้ง 5 ชนิด โดยเตรียมเป็นเส้นที่มีความกว้าง 1 เซนติเมตรและยาว 7 เซนติเมตร แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการดึง (Tensile test) ด้วยเครื่องมือ Universal testing machine ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.18 พบว่ายางธรรมชาติ (B1) นั้นสามารถรับความเค้นต่อหน่วยพื้นที่ (stress) ได้ดีที่สุดใน และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเมื่อได้รับแรงดึงก่อนจะเสียรูปร่างมากที่สุด สำหรับตัวอย่างที่เติมซิลเวอร์นาโนลงไปนั้นจะสามารถรับแรงเค้นและยืดตัวเมื่อรับแรงดึงได้น้อยลง โดยตัวอย่างที่เติมซิลเวอร์นาโน 2.00 mL นั้นมีความสามารถในการรับแรงดึงได้น้อยที่สุดและยืดตัวได้เพียงเล็กน้อยก็ถึงจุดขาด

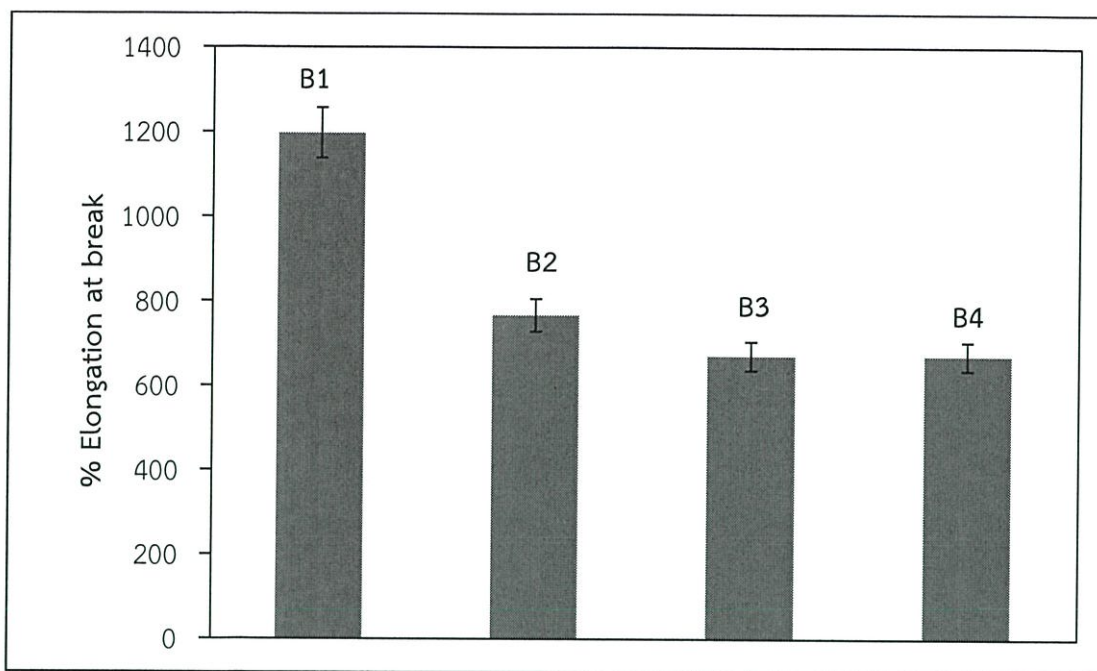
และเมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่า Young's Modulus ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของวัสดุ หาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และค่า %Elongation at break ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงร้อยละการยืดตัวของวัสดุเมื่อถึงจุดขาดเมื่อเทียบกับความยาวเริ่มต้น ดังรูป 4.19 4.20 และตารางที่ 4.6 พบว่า ค่าทั้งสองนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมซิลเวอร์นาโนลงไป ในยางธรรมชาติและลดลงมากขึ้นเมื่อเติมเป็นปริมาณมากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ซิลเวอร์นาโนนั้นไม่มีส่วนช่วยทำให้แผ่นยางคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น และยังทำให้ลดลงอีกด้วย



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่า Stress และ Percentage Strain ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นของผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.19 กราฟแสดง Young's Modulus ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นของผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.20 กราฟแสดง % Elongation at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมโพสิตผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณต่างๆ

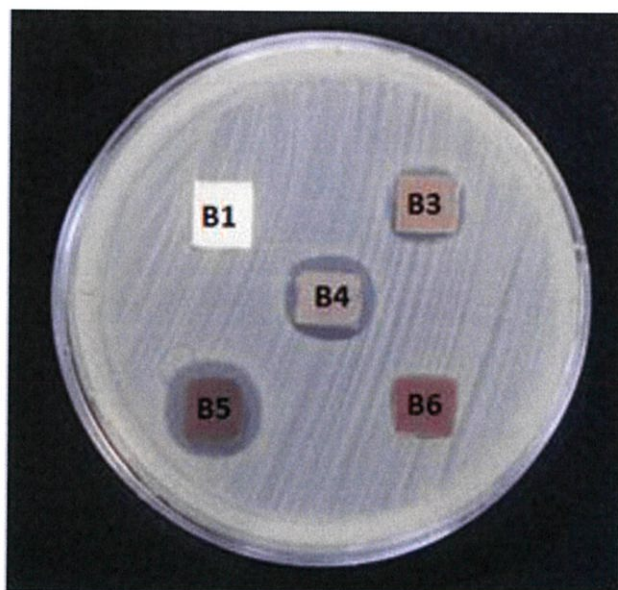
ตารางที่ 4.6 ค่า Young's Modulus และ % Elongation at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน

ชื่อตัวอย่าง	Young's Modulus	% Elongation at break
B1	0.76	1197.08
B2	0.69	767.32
B3	0.65	670.99
B4	0.46	670.76
B5	0.39	-

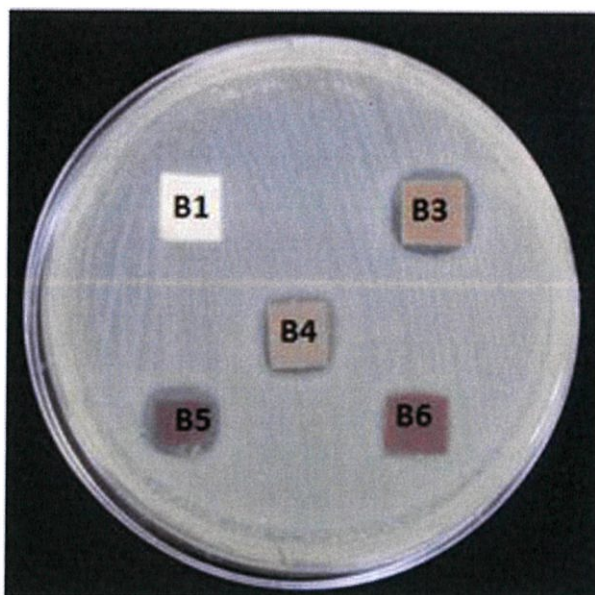
4.2.7 ผลการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน แผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทและแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลาย polyvinylpyrrolidone (PVP)

เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างได้แก่ แผ่นยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน แผ่นยางธรรมชาติผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทและแผ่นยางธรรมชาติผสมกับสารละลาย PVP แล้วนำไปทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี disc agar diffusion method โดยทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดคือ แบคทีเรียแกรมลบ *E. coli* และแบคทีเรียแกรมบวก *S. aureus* เนื่องจากเชื่อดังกล่าวเป็นสาเหตุของโรคที่เกิดกับมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ จากการ

ทดสอบพบว่าแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน (B3 B4 B5) และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6) สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ได้ในบริเวณที่มีการสัมผัสโดยตรงกับแผ่นยางคอมโพสิต แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 และพบว่าขนาด clear zone หรือบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่วัดจากขอบของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยเชื้อ *S. aureus* จะมีขนาดของ clear zone ที่กว้างกว่าที่ทดสอบด้วยเชื้อ *E. coli* แม้ว่าเชื้อ *S. aureus* เป็นเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกที่มีผนังหนากว่าเชื้อ *E. coli* ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ดังนั้นสาเหตุที่ทดสอบด้วยเชื้อ *S. aureus* จะมีขนาดของ clear zone ที่กว้างกว่าที่ทดสอบด้วยเชื้อ *E. coli* อาจเนื่องมาจากเชื้อแบคทีเรียแกรมลบมีผนังเซลล์ 2 ชั้น ซึ่งชั้นนอกสุด (outer membrane) เป็น endotoxin ซึ่งพบเฉพาะในแกรมลบเท่านั้น โดยจะมีโครงสร้างซับซ้อนมากและประกอบด้วยแอนติเจนที่เหนี่ยวนำการสร้างแอนติบอดี ดังนั้นชั้นนอกสุดจึงทำหน้าที่ป้องกันสารพิษไม่ให้เข้าสู่เซลล์ และพบว่าเมื่อใช้สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนนั้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นดังตัวอย่าง B3 B4 และ B5 ตามลำดับ

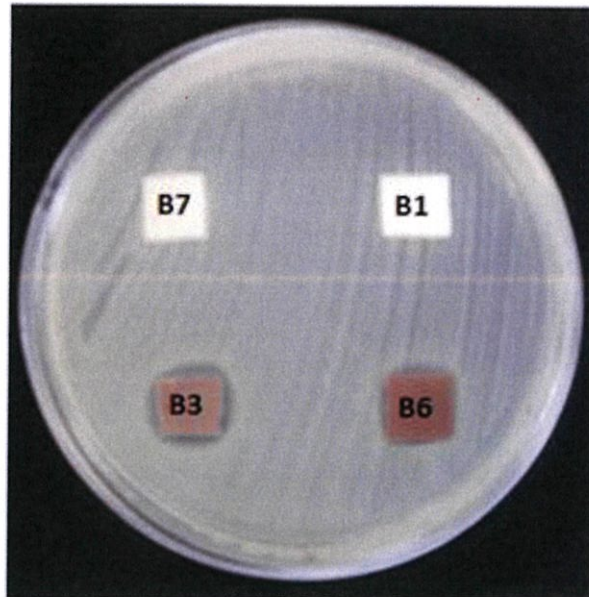


รูปที่ 4.21 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) 1.00 mL (B4) 2.00 mL (B5) และแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6)



รูปที่ 4.22 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) 1.00 mL (B4) 2.00 mL (B5) และแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6)

จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *E. coli* และเชื้อ *S. aureus* ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารละลาย PVP (B7) แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรปริมาณ 0.50 mL (B3) และแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6) พบว่าแผ่นยางคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบของซิลเวอร์มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้สังเกตได้จากบริเวณการยับยั้ง (clear zone) ที่เกิดขึ้น แต่แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน (B3) มีบริเวณการยับยั้ง (clear zone) ที่กว้างกว่าแผ่นคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B5) แม้ว่าโดยทั่วไปการจะยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีของอนุภาคซิลเวอร์จะอยู่ในรูปประจุบวก แต่ที่พบเช่นนี้อาจเป็นผลมาจากอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตรจะทำให้มีบริเวณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของอะตอมต่อปริมาตรมากขึ้น ทำให้อนุภาคของซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรจับที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อหุ้มเซลล์แล้วความชื้นจากแบคทีเรียทำให้ซิลเวอร์อนุภาคระดับนาโนเมตรแตกตัวเป็น Ag^+ และ Ag^+ ก็ทำลายเยื่อหุ้มเซลล์หรือผนังเซลล์ของแบคทีเรียและเข้าไปรบกวนกระบวนการทำงานระดับเซลล์ของแบคทีเรียทำให้แบคทีเรียตายในที่สุด และพบว่าแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมสารละลาย PVP (B7) ไม่มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากในการทดสอบไม่พบบริเวณการยับยั้ง (clear zone) เกิดขึ้นเลย แสดงดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 และขนาดขนาดของ (clear zone) หรือบริเวณการยับยั้งที่วัดจากขอบตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.23 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) แผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6) และแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลาย PVP (B7)



รูปที่ 4.24 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ของแผ่นยางธรรมชาติ (B1) แผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.50 mL (B3) แผ่นยางธรรมชาติกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (B6) และแผ่นยางธรรมชาติกับสารละลาย PVP (B7)

ตารางที่ 4.7 ขนาดของ clear zone ของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อทดสอบด้วยเชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *E. coli* (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922)

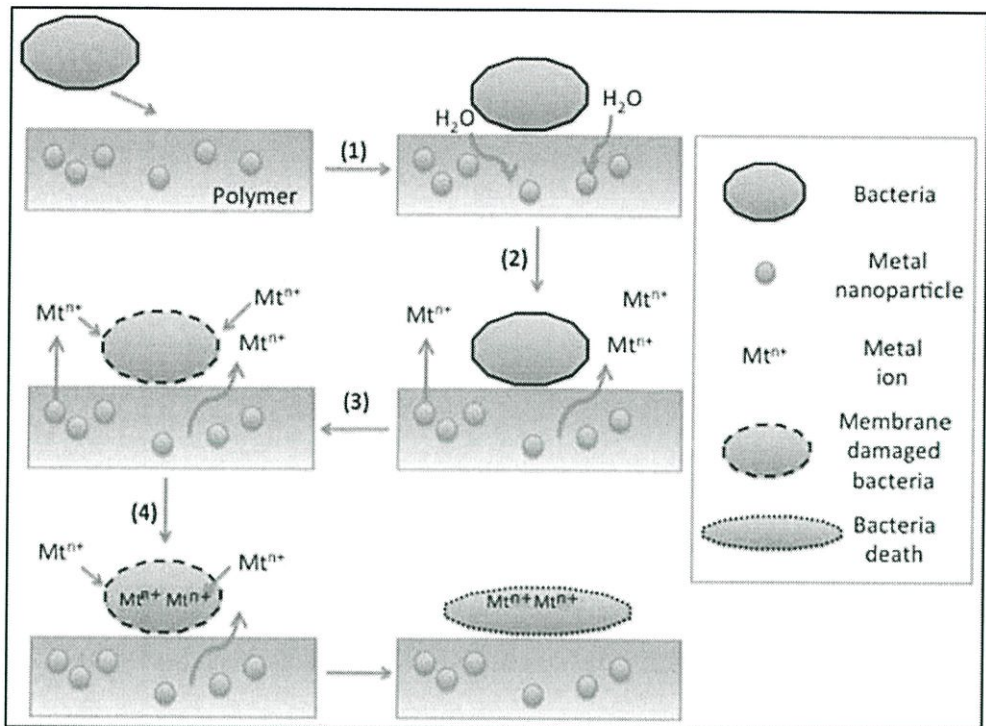
Item	Sample code	Replicate	Zone diameter (millimeter) (*)		Activity
			<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>	
1	B1	1	0	0	Inactive
		2	0	0	
		3	0	0	
2	B3	1	2.5	2.5	active
		2	2.5	2.5	
		3	2.5	2.5	
3	B4	1	3.5	2	active
		2	3.5	2	
		3	3.5	2	
4	B5	1	4	3	active
		2	4	3	
		3	4	3	
5	B6	1	1.5	1	active
		2	1.5	1	
		3	1.5	1	
6	B7	1	0	0	Inactive
		2	0	0	
		3	0	0	

หมายเหตุ Inactive คือ ไม่มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ทดสอบ

active คือ มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ทดสอบ

* คือ ขนาด Clear Zone ที่วัดจากขอบตัวอย่าง (บริเวณการยับยั้ง)

กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโนสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.25 กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางคอมโพสิต [27]

1. แบคทีเรียถูกดูดซับบนพื้นผิวของแผ่นยางคอมโพสิต แล้วความชื้นที่อยู่ในอากาศหรือในตัวของแบคทีเรียแพร่เข้าไปกระตุ้นอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่อยู่ภายในแผ่นยางคอมโพสิต
2. ความชื้นจะทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพื่อไปทำลายแบคทีเรีย
3. ซิลเวอร์ไอออนจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์หรือผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้รับความเสียหาย
4. ซิลเวอร์ไอออนสามารถเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรียได้แล้วไปทำลายส่วนต่างๆ ภายในเซลล์แล้วทำให้แบคทีเรียตายในที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับซิลเวอร์นาโน โดยจะสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนโดยวิธีการใช้ไมโครเวฟและใช้ PVP เป็นสารรักษาสภาพ และการเติมซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ลงไปในยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้กับแผ่นยาง

จากการศึกษาการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนด้วยไมโครเวฟนั้นได้ผลที่ดี โดยซิลเวอร์นาโนที่ได้จะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีเหลือง มีพีค UV-Visible อยู่ที่ความยาวคลื่นในช่วง 420 นาโนเมตร ซึ่งถือเป็นช่วงความยาวคลื่นเอกลักษณ์ของซิลเวอร์นาโน ซึ่งเมื่อใช้เวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟที่นานขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากมีการรีดิวซ์ของซิลเวอร์ไอออนที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของซิลเวอร์นาโนที่ได้สูงขึ้น และถ้าหากใช้เวลาหรือพลังงานเพิ่มขึ้น อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จะเกิดการเกาะตัวกันของอนุภาค ซึ่งดูได้จากพีคที่เลื่อนไปทางความยาวคลื่นสีแดง และถ้าใช้พลังงานที่ต่ำ ซิลเวอร์นาโนที่ได้จะมีพีค UV-Visible ที่กว้างเนื่องจากขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ และพบว่าซิลเวอร์นาโนที่ใช้เวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟ 120 วินาที แล้วใช้พลังงาน 300 วัตต์ นั้นเหมาะสมที่จะนำไปปรับปรุงสมบัติยางธรรมชาติ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM จะพบว่าซิลเวอร์นาโนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 23.51 ± 5 นาโนเมตร และกระจายตัวได้ดีซึ่งเป็นผลมาจาก PVP ซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีเหลือง

เมื่อนำซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้เติมลงในน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ กัน พบว่าการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR Raman และ XRD นั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากในทุกๆ ตัวอย่าง ซึ่งผลที่ได้แสดงถึงเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว นั่นอาจเป็นเพราะซิลเวอร์นาโนที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณน้อย จึงไม่ปรากฏขึ้นในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทั้งสอง ในส่วนของการตรวจด้วย TGA นั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมซิลเวอร์นาโนนั้นไม่มีส่วนช่วยให้แผ่นคอมโพสิตมีความทนต่อความร้อนมากขึ้นจากเดิม แต่เมื่อนำแผ่นคอมโพสิตไปทดสอบแรงดึง พบว่าแผ่นคอมโพสิตที่มีการเติมซิลเวอร์นาโนนั้นมีความทนต่อแรงดึงลดลงถ้าใช้ปริมาณซิลเวอร์นาโนมากขึ้น ส่วนผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX พบว่ามีซิลเวอร์นาโนกระจายตัวอยู่ทั่วแผ่นคอมโพสิตซึ่งเป็นผลดีจากการใช้ PVP ร่วมในการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน และเมื่อทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกคือ *S. aureus* และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบคือ *E. coli* พบว่าแผ่นยางที่เติมซิลเวอร์นาโนตรงนั้นสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ แต่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าแผ่นยางที่เติมซิลเวอร์นาโนและเมื่อเติมซิลเวอร์นาโนเพิ่มขึ้นก็ยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดมากขึ้น โดยแผ่นคอมโพสิตจะยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ดีกว่า *E. coli*

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนด้วยไมโครเวฟนั้นเป็นการสังเคราะห์ในระบบเปิด ทำให้สารแขวนลอยซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้เหลือในปริมาณน้อย เพราะเกิดการระเหยของตัวทำละลายเนื่องจากการสันของโมเลกุลที่รุนแรง เมื่อได้รับกำลังในการฉายด้วยคลื่นไมโครเวฟทำให้ยากต่อการควบคุม ดังนั้นอาจปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์ให้อยู่ในระบบปิดโดยใช้ขวดแก้วทนแรงดันที่มีฝาปิดแทนการใช้ถ้วยแก้ว
2. ในสัดส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติ สารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน และสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นในแต่ละตัวอย่างนั้น พบว่าปริมาตรรวมสุทธินั้นไม่เท่ากัน จึงอาจเติมสารละลาย PVP เพื่อปรับปริมาตรรวมของทุกตัวอย่างให้เท่ากัน
3. ในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อาจตัดชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปทรงกลม เพื่อให้ชิ้นงานมีพื้นที่สัมผัสกับแบคทีเรียได้สม่ำเสมอ และสามารถวัดขนาด Clear Zone ได้ง่ายขึ้น
4. งานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาเพิ่มเติมในด้านการเพิ่มสมบัติด้านสมบัติเชิงกลให้แก่แผ่นยางธรรมชาติได้ โดยการศึกษาการเติมสารที่มีสมบัติในการเพิ่มสมบัติเชิงกลรวมถึงสมบัติอื่นๆที่ช่วยลดข้อด้อยให้แก่แผ่นยางธรรมชาติ เพื่อการใช้งานได้จริงในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรภรณ์ ขจรไชยกูล. 2549. **ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน**. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- [2] ปิยวุฒิ มาศโค้ง, ปิยพงศ์ บัวโฮม, พงศ์ประพาส ปิยมโนชา, วุฒิพงษ์ รัชชีสันติวานนท์ และ สุรัตน์ อารีรัตน์. 2551. “การเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมผสมเส้นใยปอ.” *Ladkrabang Engineering Journal*. 25(3) : 42-47
- [3] ธวัฒน์ สร้อยทอง. 2557. “วัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยธรรมชาติสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์.” รายงานผลการวิจัย, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [4] กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์. 2546. วัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์. [Online]. Available : <http://www.kmutt.ac.th/p-prof/composite.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 .ม.ค 2559.
- [5] กฤตพร ชูแสง, มัลลิกา จงจิตต์, รศ. ยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิษฐ์ และรศ. วลัย หุตะโกวิท. 2555. “ผลการใช้นาโนเทคโนโลยีของเครื่องแต่งกายเซฟที่มีผลต่อกลิ้นและความปลอดภัยในอาหาร.” รายงานวิจัยฉบับบูรณ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [6] เบญจพร อ่อนทิมวงศ์ และปวีณา ศิริคำรณ. 2553. “การพัฒนาการตรวจสอบสารเมลามีน.” โครงการพิเศษปริญญาเกสัชศาสตรบัณฑิต คณะเภสัชศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [7] Maribel G. Guzman, Jean Dille and Stephan Godet. 2009. “Synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction method and their antibacterial activity.” *Chemical and Biomolecular Engineering*. 2(3) : 104-111.
- [8] A.I.Y. Tok, F.Y.C. Boey and X.L Zhao. 2006. “Novel synthesis of Al₂O₃ nanoparticles by flame spray pyrolysis.” *Materials Processing Technology*. 178 : 207-273.
- [9] สุทธิษา ก้อนเรือง. 2551. “การสังเคราะห์วัสดุนาโนด้วยกระบวนการทางพลาสมา.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [10] Monir Noroozi, Azmi Zakaria, Mohd Maarof Moksini, Zaidan Abd Wahab and Alam Abedini. 2012. “Green Formation of Spherical and Dendritic Silver Nanostructures under Microwave Irradiation without Reducing Agent.” *Molecular Sciences*. 13 : 8086-8096.
- [11] สุวดี ก้องพารากุล. 2556. “เทคโนโลยีการตัดแปรงยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้.” *KKU SCIENCE*. 41(3) : 567-581.
- [12] Science news. 2547. **ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)**. [Online]. Available : <http://www.electron.rmutphysics.com>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 .ม.ค. 2559.
- [13] กิตติศักดิ์ อินทรวาส และธิดาทิพย์ สีหาบุตร. 2557. “การผลิตเส้นใยนาโนจากโพลีไวนิลไพโรลิโดนผสมขมิ้น.” โครงการงานภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- [14] ดร.สุรพิชญ ลอยกุลนันท์ และทีมวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2555. สารรักษาสภาพน้ำยางยุคใหม่ (TAPS). [Online]. Available : <http://www.nstda.or.th/nstda-r-and-d/10021-treatment-nitrate>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 .ม.ค. 2559.
- [15] นิรนาม. 2559. วัสดุเชิงประกอบ. [Online]. Available : <http://www.lovelymaterials.com/composites.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 .พ.ค. 2559.
- [16] หลุทภาค กীরติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. 2552. “ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ.” วิศวกรรมสาร มก. 22(70) : 18-32.
- [17] DI T. Grausgruber, C. Ecker and Dr. M Seitzberger. 2013. Parametric Surface Modelling for Rapid Shell Mesh Setup of Railway Vehicle Car-bodies. [Online]. Available : <http://www.slideshare.net/AltairHTC/parametric-surface-modelling-for-rapid-shell-mesh-setup-of-railway-vehicle-carbodies-20869653>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 .พ.ค. 2559.
- [18] ณัฐวุฒิ คล่องนาวา. 2556. ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตจากเซรามิก (Ceramic Components) ได้อิเล็กทรอนิกส์เซรามิกในการใช้งานในเทคโนโลยีขั้นสูง. [Online]. Available : <http://www.mmthailand.com/mmnew/38-mm5-6-2013.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 .พ.ค. 2559.
- [19] นิวัฒน์ ศรีสวัสดิ์, ภิญญู พานิชพันธ์ และพินทิพ รื่นวงษา. 2559. มหัศจรรย์นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/emedial/nano/Page/index_pages.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 .พ.ค. 2559
- [20] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2000. ตารางธาตุ., Silver. [Online]. Available : <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Ag.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 .พ.ค. 2559
- [21] Theodore W Gray. 2008. Silver Ore from Jansen Set. An example of the element Silver. [Online]. Available : <http://www.periodictable.com/Items/Jansen.SilverOre/index.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 .พ.ค. 2559
- [22] พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และจิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย. 2555. ลักษณะสมบัติเฉพาะนาโนซิลเวอร์. [Online]. Available : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=8&p_id=235. เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 พ.ค. 2559.
- [23] ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 2559. หลักการของ Surface Plasmon Resonance (SPR) SPR. [Online]. Available : <http://www.nectec.or.th/rd/electronics/be313-45/be313-45.php>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 ม.ค. 2559.
- [24] NANOCOMPOSIX, INC. 2559. Silver Nanoparticles. [Online]. Available : <http://nanocomposix.com/collections/silver>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 พ.ค. 2559.

- [25] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2014. **มารู้จักกับนาโนซิลเวอร์.** [Online]. Available : <http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/296-knowledges/18889-silver-nano>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 พ.ค. 2559.
- [26] Bogumita Reidy, Andrea Haase, Andreas Luch, Kenneth A. Dawson and Iseult Lynch. 2013. **“Mechanisms of Silver Nanoparticle Release, Transformation and Toxicity: A Critical Review of Current Knowledge and Recommendations for Future Studies and Applications.”** *Materials*. 6 : 2295-2350.
- [27] Humberto Palza. 2015. **“Antimicrobial Polymers with Metal Nanoparticles.”** *Molecular Sciences*. 16 : 2099-2116.
- [28] David Picheng Huang, Ming Zhou and Timothy Dale Moser. **Damping polyurethane CMP pads with microfillers.** ประเทศสหรัฐอเมริกา. US 11/943,213. 20 พ.ย. 2007.
- [29] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์, (ผู้เรียบเรียง). 2010. **แบคทีเรีย / bacteria.** [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0197>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 พ.ค. 2559.
- [30] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. **แบคทีเรียในอาหาร (Bacteria in Food).** [Digital Library]. : สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [31] Rose Kakai. 2012. **Department of Medical Microbiology.** [Online]. Available : http://maseno.ac.ke/index/index.php?option=com_content&view=article&id=181&Itemid=240. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559.
- [32] พิริยธร สุวรรณมาลา และเกศินี เหมวิเชียร. 2551. **การเตรียมอนุภาคนาโนเงินที่ทำให้เสถียรโดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยการฉายรังสีแกมมา Preparation of PVA Stabilized Silver Nanoparticles by Gamma Irradiation.** [Online]. Available : <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104p.html>. วันที่ 15 พ.ค. 2559.
- [33] Majid Darroudi, Mansor B. Ahmad, Reza Zamiri, Abdul Halim Abdullah, Nor Azowa Ibrahim, Kamyar Shameli and M. Shahril Husin. 2010. **“Preparation and characterization of gelatin mediated silver nanoparticles by laser ablation.”** *Alloys and Compounds*. 509 (2011) : 1301–1304.
- [34] Kushal D. Bhatte, Krishna M. Deshmukh, Yogesh P. Patil, Dinesh N. Sawant, Shin-Ichiro Fujita, Masahiko Arai and Bhalchandra M. Bhanage. 2011. **“Synthesis of powdered silver nanoparticles using hydrogen in aqueous medium.”** *Particuology*. 2012 (10) : 140–143.
- [35] Kandarp Mavani and Mihir Shah. 2013. **“Synthesis of Silver Nanoparticles by using Sodium Borohydride as a Reducing Agent.”** *Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2(3) : 1-5.

- [36] W. G. I. U. Rathnayake, H. Ismail, A. Baharin, I. M. C. C. D. Bandara and Sanath Rajapakse. 2014. "Enhancement of the Antibacterial Activity of Natural Rubber Latex Foam by the Incorporation of Zinc Oxide Nanoparticles." *Applied Polymer science*. 2014(131) : 1-8.
- [37] Gownolla Malegowd Raghavendra, Jeyoung Jung, Dowan kim and Jongchul Seo. 2015. "Microwave assisted antibacterial chitosan-silver nanocomposite films." *Biological Macromolecules*. 2016(84) : 281-288.
- [39] วีระชัย แสงฉาย. 2551. "สมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [40] Eder Jose Guidelli, Ana Paula Ramos, Maria Elisabete D. Zaniquelli, Oswaldo Baffa. 2011. "Green synthesis of colloidal silver nanoparticles using natural rubber latex extracted from *Hevea brasiliensis*." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 82(2011) 140-145.

ประวัติผู้ทำวิจัย



ชื่อ-สกุล นายปรัชญา มาสุข
วัน เดือน ปีเกิด 12 มกราคม พ.ศ. 2537

ประวัติการศึกษา
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
สายวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนแก่งคอย

ระดับปริญญาตรี

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต แขนงวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: Coach_id@hotmail.com



ชื่อ-สกุล นางสาววนิดา เกาะม่วง
วัน เดือน ปีเกิด 2 กันยายน พ.ศ. 2536

ประวัติการศึกษา
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
สายวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนหนองบัวแดงวิทยา

ระดับปริญญาตรี

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต แขนงวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: wanida_k29@hotmail.com

ประวัติผู้ทำวิจัย (ต่อ)



ชื่อ-สกุล นางสาววรรณภา วุฒิโส
วัน เดือน ปีเกิด 26 มิถุนายน พ.ศ. 2536

ประวัติการศึกษา
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
สายวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนหินกองวิทยาคม

ระดับปริญญาตรี

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต แขนงวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: wannapha_wut@hotmail.com