

การพัฒนาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโฟมยางธรรมชาติโดยใช้ขมิ้นชัน  
และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

IMPROVEMENT OF ANTI-BACTERIAL PROPERTY OF  
NATURAL RUBBER FOAMS USING TURMERIC AND  
SILVER NANOPARTICLES

มณฑล แสงสว่าง  
MONTHOL SAENGSAWANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2563

KMITL-2019-SC-M-012-039

การพัฒนาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโฟมยางธรรมชาติโดยใช้ขมิ้นชัน  
และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

IMPROVEMENT OF ANTI-BACTERIAL PROPERTY OF  
NATURAL RUBBER FOAMS USING TURMERIC AND  
SILVER NANOPARTICLES

มณฑล แสงสว่าง

MONTHOL SAENGSAWANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2563

KMITL-2019-SC-M-012-039

IMPROVEMENT OF ANTI-BACTERIAL PROPERTY OF  
NATURAL RUBBER FOAMS USING TUMERIC AND  
SILVER NANOPARTICLES

MONTHOL SAENGSAWANG

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

2020

KMITL-2019-SC-M-012-039

COPYRIGHT 2020

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ธรรมชาติโดยใช้ไขมันชั้นและอนุภาคซิลเวอร์นาโน
ชื่อนักศึกษา	นายมณฑล แสงสว่าง
รหัสนักศึกษา	60605026
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมีประยุกต์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการพัฒนาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ธรรมชาติ (NRF) ด้วยไขมันชั้นและอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) รวมทั้งยังได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ธรรมชาตินี้อีกด้วย โดยเริ่มจากการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยกระบวนการไมโครเวฟ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้เคอร์คูมิน (Curcumin) ซึ่งเป็นสารประกอบจากผงขมิ้นเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และตัวช่วยสร้างเสถียรภาพ (Stabilizer) โดยปราศจากการใช้ตัวรีดิวซ์ที่เป็นสารเคมีอันตรายต่อสุขภาพ จากนั้นได้ทำเตรียมน้ำขมิ้นชั้นจากขมิ้นชั้นสดด้วยกระบวนการสกัดอย่างง่าย และได้ทำการศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติ จากกระบวนการดัดแปลงวิธีของดันลอป (Modified dunlop's process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย ใช้เวลาสั้น และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะทำการศึกษา (1) เวลาที่ใช้ในการตีฟองที่แตกต่างกันได้แก่ 3 5 และ 7 นาที (2) การเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ 0.064 0.190 และ 0.320 phr และ (3) การเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดในปริมาณคงที่ที่ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้ในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ 0.014 และ 0.028 phr จะเตรียมได้ หลังจากนั้นอนุภาคซิลเวอร์นาโนและโพลีเมอร์ธรรมชาติทั้งหมดที่เตรียมได้จะสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-vis) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) เครื่องวิเคราะห์การกระจายและการสะท้อนของแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิบิล (DRS) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (SEM-EDS) พบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงและภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน สามารถยืนยันได้ว่ามีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 19.86 – 38.26 นาโนเมตร จากเทคนิค XRD และ FT-IR แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของโพลีเมอร์ธรรมชาติมีความสอดคล้องกับยางธรรมชาติและขมิ้นชั้นเริ่มต้น ผลจากเทคนิค DRS พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำขมิ้นในโพลีเมอร์ธรรมชาติมากขึ้น จะมีแถบการดูดกลืนช่วงความคลื่น 400 – 500 นาโนเมตรเพิ่มสูงขึ้น ผลจากเทคนิค SEM

พบว่าโพลีเอทิลีนที่ใช้เวลาในการตีฟองแตกต่างกันได้แก่ 3 5 และ 7 นาที มีแนวโน้มขนาดเฉลี่ยของเซลล์ลดลง เมื่อทำการเติมน้ำมันชั้นลงไป ปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr ก็จะมีแนวโน้มขนาดเฉลี่ยของเซลล์ลดลงเช่นกัน เนื่องมาจากการเติมน้ำมันลงไปทำให้ความหนืดของของผสมในการเกิดฟองเพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้ขนาดเฉลี่ยของเซลล์เล็กลง และเมื่อเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.014 และ 0.028 phr พบว่ามีแนวโน้มขนาดเฉลี่ยของเซลล์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเฉลี่ยของเซลล์ของโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสัด นอกจากนี้เทคนิค EDS ก็ช่วยยืนยันได้ว่ามีธาตุซิลเวอร์กระจายตัวอยู่ในโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ผลการทดสอบการต้านแรงดึงและแรงกดอัด (ค่าความเค้นสูงสุด ค่าแรงดึงที่จุดขาด ค่าการคงรูป และค่ามอดูลัสของยัง) พบว่าการเติมน้ำมันชั้นและอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปโพลีเอทิลีนทำให้สมบัติเชิงกลลดลงไปเล็กน้อย แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) ให้กับโพลีเอทิลีนได้ จากขนาดโซนยับยั้ง 14.1 เป็น 15.6 มิลลิเมตร และ 14.5 เป็น 15.6 15.4 มิลลิเมตรตามลำดับ

**คำสำคัญ :** โพลีเอทิลีน กระบวนการดันลอป กระบวนการไมโครเวฟ น้ำมันชั้น เคอร์คูมิน อนุภาคซิลเวอร์นาโน

<b>Thesis Title</b>	Improvement of Anti - bacterial Property of Natural Rubber Foams Using Turmeric and Silver Nanoparticles
<b>Student Name</b>	Mr. Monthol Saengsawang
<b>Student ID</b>	60605026
<b>Degree</b>	Master of Science (Applied Chemistry)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2020
<b>Thesis Advisor</b>	Assist. Prof. Dr. Chaval Sriwong

### Abstract

This research studied the improvement of anti-bacterial property of natural rubber foams using turmeric and silver nanoparticles, including mechanical property. Firstly, silver nanoparticle (AgNPs) colloid was synthesized by a microwave assisted method using curcumin as reductant and stabilizer without toxic chemical. Secondly, turmeric suspension was prepared via a simple extraction method. Thirdly, natural rubber foams (NRF) was prepared by a modified Dunlop's process. The effects of (1) various of foaming time; 3, 5 and 7 min, (2) various amounts of turmeric loading; 0.064, 0.190 and 0.320 phr, and (3) various amounts of AgNPs loading; 0.014 and 0.028 phr were also investigated. Then, the synthesized AgNPs, turmeric and all of NRF and NRF composite samples were characterized by UV-Vis TEM XRD FT-IR DRS and SEM-EDS techniques. The results showed that synthesized AgNPs colloid was well-confirmed by UV-Vis and TEM with the average particle size was 19.86 – 38.26 nm. The crystal structural and functional groups of natural rubber foam were also analyzed by XRD and FT-IR. The results indicated that their related with isoprene group of pristine natural rubber (NR). Meanwhile, DRS result was confirmed the increase of turmeric contents in NRF composite along with the incising of turmeric loading. SEM results revealed that the several microstructures both cell size and pore size of the prepared NRF and NRF composite samples were depended on the effect of various of foaming time, various amount of turmeric loading and various amount of AgNPs loading. EDS result was confirmed that AgNPs could exist and disperse into NRF matrix. In addition, the mechanical property of NRF and NRF composite samples were tested by using universal testing machine (UTM). The results indicated that the values of stress at maximum, load at break, stiffness and Young's modulus of NRF samples prepared by

increasing turmeric and AgNPs loading had slightly decreased. Moreover, the effects of both turmeric and AgNPs loading contents into NRF composites could increase the anti-bacterial activity against with gram-positive (*S.aureus*) and gram-negative (*E.coli*) bacteria. The inhibition zones were increased from 14.1 to 15.6 mm and 14.5 to 15.4 mm for *S.aureus*. and *E.coli*, respectively.

**Keywords** : Natural rubber foam (NRF), Dunlop's process, Microwave assisted method, Turmeric, Curcumin, Silver nanoparticles (AgNPs)

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความอนุเคราะห์และความกรุณาจากคณาจารย์และบุคคลผู้มีพระคุณ ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ช่วยแนะนำให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดจนถ่ายทอดประสบการณ์ในการทำงานของท่านเพื่อเป็นประโยชน์ในการคิดวิเคราะห์การวางแผนงานในงานวิจัยนี้ โดยท่านได้ให้คำปรึกษาต่อข้าพเจ้าอย่างดียิ่ง นับตั้งแต่การค้นหาข้อมูล ตลอดจนถึงสิ้นสุดการทำวิจัย รวมทั้งตรวจทานและแก้ไขงานวิจัยนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวิตา สุวรรณชวลิต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปานไพลิน สีหาราช ที่สละเวลามาเป็นคณะกรรมการในการสอบงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้ความรู้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบแก้ไขให้โครงการพิเศษเล่มนี้ออกมาสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำรวมถึงแนวทางแก้ปัญหา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณนางสาว เมตตา สุขเจริญ พนักงานฝ่ายวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางการยางแห่งประเทศไทย ที่คอยให้คำแนะนำ และจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ ๆ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และญาติผู้ล่วงลับ ที่ได้มอบความรักอันเป็นกำลังใจที่ดีสำหรับข้าพเจ้า จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

มณฑล แสงสว่าง



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 กลไกการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	19
2.4.4 กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	20
2.5 แบคทีเรีย.....	22
2.5.1 ประเภทของแบคทีเรีย.....	23
2.5.1.1 แบ่งตามการใช้ออกซิเจน.....	23
2.5.1.2 แบ่งตามการรูปร่าง.....	24
2.5.1.3 แบ่งตามการย้อมติดสี.....	25
2.5.2 <i>Staphylococcus aureus</i> .....	26
2.5.3 <i>Escherichia coli</i> .....	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27
2.6.1 Synthesis and characterization of nano silver based natural rubber latex foam for imparting antibacterial and anti-fungal properties. ....	28
2.6.2 The production of graphene nanosheets decorated with silver nanoparticles for use in transparent, conductive films.....	30
2.6.3 Green Synthesis of Silver Nanoparticles using Turmeric Extracts and Investigation of their Antibacterial Activities .....	30
2.6.4 Effect of Synthesized Ag Nanoparticles by Using the Different Amounts of Polyvinylpyrrolidone for Ag-Natural Rubber Hybrid Sheets and their Antibacterial Properties.....	31
2.6.5 Curcumin-releasing chitosan/aloe membrane for skin regeneration.....	32
2.6.6 Investigation on Curcumin nanocomposite for wound dressing.....	32
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>34</b>
3.1 สารเคมี.....	34
3.2 เครื่องมือที่และอุปกรณ์ .....	35
3.3 วิธีการทดลอง .....	36
3.3.1 การเตรียมน้ำขมิ้นชัน จากเหง้าขมิ้นสด.....	36
3.3.2 การศึกษาผลของปริมาณน้ำขมิ้นและเวลาในการไมโครเวฟ ของการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน จากผงขมิ้นชัน .....	37
3.3.3 การเตรียมโฟมยางธรรมชาติรูปแบบต่าง ๆ.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3.1 โฟมยางธรรมชาติ (NRF).....	39
3.3.3.2 โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำขี้ผึ้ง (NRF+T) .....	41
3.3.3.3 โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำขี้ผึ้งกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน (NRF+T+Ag).....	43
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ .....	46
3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV- Vis spectrophotometer).....	46
3.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron micro- scope, TEM).....	47
3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) .....	48
3.4.4 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy dispersive x-ray spectroscopy, EDS).....	49
3.4.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)...	49
3.4.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier – Transform Infrared Spectrometer, FT-IR).....	50
3.4.7 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) .....	50
3.4.8 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial property test) ..	51
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b> .....	<b>52</b>
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์อนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	52
4.1.1 การศึกษาผลของเวลาการให้คลื่นไมโครเวฟในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาค ซิลเวอร์นาโน .....	52
4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง .....	52
4.1.2 การศึกษาผลของปริมาณน้ำขี้ผึ้ง ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์ นาโน.....	55
4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง .....	55
4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	56
4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ .....	58
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงขี้ผึ้งและน้ำขี้ผึ้ง .....	60
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล .....	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม .....	61
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน .....	61
4.3.2 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล .....	62
4.3.3 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง.....	65
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค.....	66
4.3.4.1 สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟองที่แตกต่าง คือ 3 5 และ 7 นาที.....	67
4.3.4.2 สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ธรรมชาติ และโพลีเมอร์ผสมน้ำ ไขมันชั้นสัดที่ปริมาณน้ำไขมันชั้นสัดแตกต่างกันคือ 0.064 0.190 และ 0.320 phr.....	69
4.3.4.3 สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ผสมน้ำไขมันชั้นสัดที่ปริมาณ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 0.014 และ 0.028 phr .....	71
4.3.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ .....	73
4.3.5.1 โพลีเมอร์ธรรมชาติ .....	74
4.3.5.2 โพลีเมอร์ผสมน้ำไขมันชั้นสัด 0.064 0.190 และ 0.320 phr	75
4.3.5.3 โพลีเมอร์ผสมน้ำไขมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนประมาณ 0.014 และ 0.028 phr .....	78
4.4 สมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม .....	80
4.5 สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ธรรมชาติและ โพลีเมอร์ผสม.....	90
4.5.1 การศึกษาผลของน้ำไขมันชั้นสัด น้ำไขมันชั้น และสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์ นาโนที่เตรียมได้ ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย .....	90
4.5.2 การศึกษาผลของปริมาณน้ำไขมันชั้นสัดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ ธรรมชาติผสม .....	91
4.5.3 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโน ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของ โพลีเมอร์ผสม .....	92
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>95</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	96
เอกสารอ้างอิง .....	97

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก.....	105
ภาคผนวก ข.....	108
ภาคผนวก ค.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	113

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบน้ำยาล้างชั้นชนิดต่าง ๆ .....	7
2.2 เปรียบเทียบลักษณะและคุณสมบัติของโพนยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากกระบวนการ ดันลอป และทาลาเลย์.....	12
2.3 การเปรียบเทียบลักษณะของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ .....	25
2.4 แสดงขนาดของบริเวณยับยั้งแบคทีเรียของผ้าปิดแผลที่เคลือบด้วยเคอร์คูมิน นาโน คอมโพสิท .....	33
3.1 แสดงเงื่อนไขของเวลาในการให้คลื่นไมโครเวฟในการเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน...	38
3.2 แสดงเงื่อนไขของสัดส่วนของน้ำขมิ้นในการเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน.....	38
3.3 แสดงสัดส่วนของการเตรียมโพนยางธรรมชาติ.....	45
4.1 หมูฟังก์ชันที่สำคัญในผงขมิ้น และน้ำขมิ้นชั้นสด .....	60
4.2 หมูฟังก์ชันที่สำคัญในโพนยางธรรมชาติ โพนยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสด และโพนยาง ธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	65
4.3 ขนาดเฉลี่ยของเซลล์และรูพรุนของโพนยางธรรมชาติ โพนยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสด และโพนยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	73
4.4 ค่าการต้านทานแรงดึงของโพนยางธรรมชาติ โพนยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสด และโพน ยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	81
4.5 ค่าการต้านทานแรงกดของโพนยางธรรมชาติ โพนยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสด และโพน ยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	85
4.6 โซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> และ <i>E.coli</i> ของโพนยางธรรมชาติ โพนยางธรรมชาติ ผสมน้ำขมิ้นชั้นสด และโพนยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ ปริมาณต่างๆ.....	93
ก.1 น้ำหนักเฉลี่ยของสารเคมีที่ใช้เตรียมโพนยางธรรมชาติ .....	106
ก.2 ปริมาตรที่ต้องเปิดของสารเคมีแต่ละตัวในการเตรียมโพนยางธรรมชาติ .....	107
ข.1 ภาพถ่ายของโพนยางธรรมชาติ และโพนยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดที่ปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr.....	108
ข.2 ภาพถ่ายของโพนยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดที่ปริมาณ 0.190 phr และ โพนยาง ธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชั้นสดที่ปริมาณ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.014 และ 0.028 phr.....	108

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
2.3	6
2.4	7
2.5	8
2.6	9
2.7	9
2.8	10
2.9	10
2.10	11
2.11	11
2.12	14
2.13	14
2.14	15
2.15	16
2.16	19
2.17	20
2.18	21
2.19	21
2.20	22
2.21	23
2.22	24
2.23	24
2.24	25
2.25	26
2.26	26

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 ลักษณะของโพลีเมอร์ที่เตรียมได้ (a) ไม่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน และ (b) เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	28
2.28 สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ที่เตรียมได้ a และ c คือ โพลีเมอร์ที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน, b และ d คือ โพลีเมอร์ที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน (i) <i>Escherichia coli</i> และ (ii) <i>methicillin resistant Staphylococcus aureus (MRSA)</i> .....	29
2.29 สมบัติการยับยั้งเชื้อราของโพลีเมอร์ที่เตรียมได้ (a) ไม่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน และ (b) เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	29
2.30 สารละลายผสมระหว่างน้ำมันและซิลเวอร์นาโนในเตรต a คือก่อนทำการปั่นกวน b คือหลังการปั่นกวน 24 ชั่วโมง และ (B) UV-Vis spectra พิเคอแกลกซ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	30
2.31 สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการใช้ปริมาณของ PVP แตกต่างกัน.....	31
2.32 บริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากแผ่นโพลีเมอร์ที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	31
2.33 ลักษณะบาดแผลของหนูวีสตาร์ที่ถูกปิดด้วยแผ่นรักษาผิวหนัง.....	32
2.34 ลักษณะของสารแขวนลอยเคอร์คูมิน นาโนคอมโพสิต .....	32
2.35 ลักษณะของผ้าฝ้าย (a) ผ้าฝ้ายก่อนถูกเคลือบ และ (b) ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยเคอร์คูมิน นาโนคอมโพสิต .....	33
3.1 ภาพถ่ายของ (1) ชั้นไขมัน (2) ชั้นไขมันที่หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ (3) การดำซึมชั้นไขมันในครกหิน (4) การปั่นกวนชั้นไขมันที่บดละเอียดด้วยน้ำร้อน (5) การกรองน้ำมันชั้นออกจากเศษผงไขมันชั้น และ (6) น้ำมันชั้นไขมัน.....	36
3.2 ภาพถ่ายของ (1) น้ำมันชั้นความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (2) สารละลายซิลเวอร์นาโนในเตรต และน้ำมันชั้น (3) สารผสมระหว่างสารละลายซิลเวอร์นาโนในเตรต และน้ำมันชั้น ก่อนนำไปเข้าเครื่องไมโครเวฟ (4) กระบวนการให้คลื่นไมโครเวฟด้วยเครื่องไมโครเวฟขนาดกำลังไฟ 450 วัตต์ และ (5) สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้.....	38
3.3 ภาพถ่ายของ (1) การเหนี่ยวนำของโพลีเมอร์ลงในโถต้ของเครื่องต้มอาหาร (2) การเติมสารแขวนลอยโพลีเมอร์ที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในน้ำยาธรรมชาติ (3) การตีฟองน้ำยาธรรมชาติด้วยความเร็วสูงสุด (4) การเติมสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ และสารแขวนลอยไดฟีนิลกัวนีนติน (5) การเทฟองลงในแบบพิมพ์ (6) การซักล้างโพลีเมอร์ที่เตรียมได้ และ (7) โพลีเมอร์ที่เตรียมได้.....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	42
ภาพถ่ายของ (1) การเทน้ำยางธรรมชาติลงในโถตีของเครื่องตีผสมอาหาร (2) การเติมสาร แขนวลอยโพแทสเซียมโอเลตลงไปใต้น้ำยางธรรมชาติ (3) การตีฟองน้ำยางธรรมชาติด้วยความ ความเร็วสูงสุด (4) การเติมน้ำมันชั้นลงในฟองยาง (5) การเติมสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ และสารแขวนลอยไดฟีนิลกัวนิดีน (6) การเทฟองยางลงในแบบพิมพ์ (7) การพักฟองยางใน แบบพิมพ์ (8) การอบฟองยางในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ (9) – (11) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr ตามลำดับ .....	
3.5	44
ภาพถ่ายของ (1) การเทน้ำยางธรรมชาติลงในโถตีของเครื่องตีผสมอาหาร (2) การเติมสารแขวนลอยโพแทสเซียมโอเลตลงไปใต้น้ำยางธรรมชาติ (3) การตีฟอง น้ำยางธรรมชาติด้วยความเร็วสูงสุด (4) สารผสมระหว่างน้ำมันชั้นกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน (5) การตีฟองด้วยความเร็วสูงสุด (6) การเติมสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ และสารแขวน ลอยไดฟีนิลกัวนิดีน (7) การเทฟองยางลงในแบบพิมพ์ (8) การพักฟองยางในแบบพิมพ์ (9) การอบฟองยางในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ (10) – (11) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.014 และ 0.028 phr ตามลำดับ .....	
3.6	45
เปรียบเทียบลักษณะของโฟมยางธรรมชาติ NRF, NRF+T0.064, NRF+T0.190 และ NRF+T0.320 ตามลำดับ .....	
3.7	46
หลักการเบื้องต้นของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ .....	
3.8	47
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน .....	
3.9	48
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	
3.10	49
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ .....	
3.11	50
เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ .....	
3.12	51
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) (ซ้าย) และ เครื่อง ทดสอบเนกประสงค์ (ขวา) .....	
4.1	53
ภาพถ่ายของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟโดยใช้เวลา ในการให้คลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างกัน ดังนี้ 0 30 60 90 120 150 180 และ 210 วินาที ตามลำดับ .....	
4.2	53
การดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการใช้ปริมาณน้ำมัน 5 มิลลิลิตรและเวลาในการให้คลื่นไมโครเวฟแตกต่างกัน 0 30 60 90 120 150 180 และ 210 วินาที ด้วยกำลังไฟ 450 วัตต์ .....	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 (a) โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเคอร์คูมิน, (b) อันตรกิริยาระหว่างซิลเวอร์ไอออนกับโมเลกุลเคอร์คูมิน และ (c) นิวคลีเอชันของ $Ag^0$ ที่เกิดบนโมเลกุลเคอร์คูมินในระหว่างกระบวนการไมโครเวฟ.....	54
4.4 ภาพถ่ายของสารละลายซิลเวอร์ในเตรต สารแขวนลอยน้ำมันผสมซิลเวอร์ในเตรต (a) ก่อนกระบวนการไมโครเวฟ และสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์ในเตรต (b) หลังกระบวนการไมโครเวฟ .....	55
4.5 การดูดกลืนแสงของสารละลายซิลเวอร์ในเตรตและสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการใช้น้ำมันในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 1 3 5 6 และ 7 mL หลังผ่านกระบวนการไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ เวลา 150 วินาที .....	56
4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (a) ขนาดของการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ (b) จากปริมาณน้ำมัน 1 มิลลิลิตร (c และ e) ขนาดของการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ (d และ f) จากปริมาณน้ำมัน 5 และ 7 มิลลิลิตร ตามลำดับ และวงแหวนการกระจายตัว (SAED) แสดงเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	56
4.7 (a) EDS spectrum และองค์ประกอบของธาตุในอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากน้ำมันปริมาณ 1 มิลลิลิตร (b และ c) EDS spectrum และองค์ประกอบของธาตุในอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากน้ำมันปริมาณ 5 และ 7 มิลลิลิตร ตามลำดับ .....	58
4.8 กราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) ผงขมิ้นชันเชิงการค้า และ (b) ผงขมิ้นชันจากน้ำมันชันสด	60
4.9 XRD pattern ของ (a) แผ่นยางธรรมชาติบริสุทธิ์ (b) โฟมยางธรรมชาติ (c – d) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสดที่ปริมาณ 0.190 และ 0.320 phr ตามลำดับ และ (e) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	61
4.10 XRD pattern ของผงขมิ้นชันธรรมชาติจากงานวิจัยของ M.M. Kiyani และคณะ.....	62
4.11 กราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) ยางธรรมชาติบริสุทธิ์ (b) โฟมยางธรรมชาติ (c) และ (d) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสดที่ปริมาณ 0.064 และ 0.320 phr ตามลำดับ .....	63
4.12 กราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) ยางธรรมชาติบริสุทธิ์ (b) โฟมยางธรรมชาติ (c) และ (d) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์ที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr ตามลำดับ.....	64
4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโฟมยางธรรมชาติ และโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสดที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0.064 0.190 และ 0.320 phr ตามลำดับ.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโพลีเอทิลีนของโพลีเอทิลีนชนิดผลึก โพลีเอทิลีนชนิดอสัณฐานน้ำหนักชั้นสด ที่ปริมาณ 0.190 phr และ โพลีเอทิลีนชนิดผลึกกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่ปริมาณ 0.014 และ 0.028 phr.....	66
4.15 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโพลีเอทิลีนชนิดผลึกที่ใช้เวลาในการตีฟอง แตกต่างกันคือ (a) 3 นาที (b) 5 นาที และ (c) 7 นาที ด้วยกำลังขยาย (I) 100x (II) 300x และ (III) 500x ตามลำดับ .....	67
4.16 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโพลีเอทิลีนชนิดผลึกที่ใช้เวลาในการตีฟอง แตกต่างกันคือ (a) 3 นาที (b) 5 นาที และ (c) 7 นาที (II) กราฟการกระจายตัวของขนาด ของเซลล์ และ (III) กราฟการกระจายตัวของขนาดของรูพรุน.....	68
4.17 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของ (a) โพลีเอทิลีนชนิดผลึก และโพลีเอทิลีนชนิดอสัณฐานน้ำหนักชั้นสด ที่ใช้ปริมาณน้ำหนักชั้นสดต่างกันคือ (b) 0.064 (c) 0.190 และ (d) 0.320 phr ด้วยกำลังขยาย (I) 100x (II) 300x และ (III) 500x.....	69
4.18 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโพลีเอทิลีนชนิดผลึกที่ใช้ปริมาณของ น้ำหนักชั้นสดแตกต่างกันคือ (a) 0.064 และ (b) 0.190 phr (II) กราฟการกระจายตัว ของขนาดของเซลล์ และ (III) กราฟการกระจายตัวของขนาดของรูพรุน.....	70
4.19 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโพลีเอทิลีนชนิดผลึกกับ อนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่ใช้ปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ต่างกันคือ (a) 0.014 และ (b) 0.028 phr ด้วยกำลังขยาย (I) 100x (II) 300x และ (III) 500x.....	71
4.20 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโพลีเอทิลีนชนิดผลึกกับ อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ ใช้ปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนแตกต่างกันคือ (a) 0.014 และ (b) 0.028 phr (II) กราฟการกระจายตัวของขนาดของเซลล์ และ (III) กราฟ การกระจายตัวของขนาดของรูพรุน .....	72
4.21 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโพลีเอทิลีนชนิดผลึก และ (b) – (g) แผนที่ การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และสังกะสี (Zn) ตามลำดับ .....	74
4.22 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโพลีเอทิลีนชนิดอสัณฐานน้ำหนักชั้นสด 0.064 phr และ (b) – (g) แผนที่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และสังกะสี (Zn) ตามลำดับ.....	75
4.23 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโพลีเอทิลีนชนิดผลึกกับ อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ ใช้ปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนแตกต่างกันคือ (a) 0.014 และ (b) 0.028 phr และ (b) – (g) แผนที่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และสังกะสี (Zn) ตามลำดับ.....	76

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.320 phr และ (b) – (g) แผนภาพการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และสังกะสี (Zn) ตามลำดับ .....	77
4.25 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.014 phr และ (b) – (g) แผนภาพการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และสังกะสี (Zn) ตามลำดับ .....	78
4.26 (a) EDS spectrum และองค์ประกอบของธาตุในโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.028 phr และ (b) – (g) แผนภาพการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) สังกะสี (Zn) และ ซิลเวอร์ (Ag) .....	79
4.27 กราฟเปรียบเทียบ Stress at maximum load จากการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	81
4.28 กราฟเปรียบเทียบ Load at break จากการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	82
4.29 กราฟเปรียบเทียบ Stiffness จากการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน .....	82
4.30 กราฟเปรียบเทียบ Young’s modulus จากการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	83
4.31 กราฟเปรียบเทียบ Tensile testing จากการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr.....	84
4.32 กราฟเปรียบเทียบ Young’s modulus จากการต้านทานแรงกดของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	86
4.33 กราฟเปรียบเทียบ Stiffness จากการต้านทานแรงกดของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 กราฟเปรียบเทียบ Young's modulus จากการต้านทานแรงกดของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	87
4.35 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบแรงกด (Compression test) ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้เวลาในการตีฟองแตกต่างกันคือ 3 5 และ 7 นาที.....	88
4.36 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบแรงกด (Compression test) ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr.....	89
4.37 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) <i>S.aureus</i> และ (b) <i>E.coli</i> ของ (A) น้ำขมิ้นชันสด (B) น้ำขมิ้น และ (C) สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้.....	90
4.38 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) <i>S.aureus</i> และ (b) <i>E.coli</i> ของ (A) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (B) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.064 phr (C) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.190 phr และ (D) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.320 phr.....	91
4.39 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) <i>S.aureus</i> และ (b) <i>E.coli</i> ของ (A) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (B) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.014 phr และ (C) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.028 phr .....	92
4.40 การเปรียบเทียบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ( <i>S.aureus</i> ) และแบคทีเรียแกรมลบ ( <i>E.coli</i> ) ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr.....	94
4.41 การเปรียบเทียบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ( <i>S.aureus</i> ) และแบคทีเรียแกรมลบ ( <i>E.coli</i> ) ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ 0.190 phr และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.014 และ 0.028 phr .....	94
ค.1 กราฟ FT-IR ของขมิ้นสด.....	109
ค.2 กราฟ FT-IR ของผงขมิ้น.....	109
ค.3 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	110
ค.4 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.064 phr.....	110
ค.5 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.320 phr.....	111
ค.6 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.014 phr.....	111
ค.7 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.028 phr .....	112

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการวิจัย

ยางธรรมชาติหรือยางพารา (Natural rubber) ถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจและทรัพยากรที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของประเทศ ซึ่งพบว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกวัตถุดิบยางพารามากที่สุดในโลก ซึ่งกระทรวงพาณิชย์ได้เปิดเผยว่าในปี พ.ศ. 2560 ผลิตภัณฑ์จากยางมีอัตราการขยายตัวของมูลค่าส่งออกถึงร้อยละ 53.8 [1] ไม่ว่าจะส่งออกในรูปแบบของน้ำยางธรรมชาติชนิดเข้มข้นหรือยางแท่ง ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติที่โดดเด่นของยางธรรมชาติในเรื่องความแข็งแรงและยืดหยุ่นค่อนข้างสูง ทนต่อแรงดึงยืด แรงเฉือน และทนต่อการฉีกขาดได้ดี ดังนั้นยางธรรมชาติจึงนิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ รวมไปถึงอุปกรณ์ และ ชิ้นส่วนต่าง ๆ มากมาย เช่น ถุงมือ ถุงยางอนามัย ยางรัดของ ปะเก็น เทปปิดรอยรั่ว วัสดุปูพื้น หรือ เป็นส่วนผสมในการผลิตยางล้อรถ เป็นต้น [2]

แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าประเทศไทยสามารถผลิตยางพาราส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก แต่ปริมาณการแปรรูปน้ำยางพาราภายในประเทศนั้นมีปริมาณที่ต่ำ และก็ยังพบว่าราคาของยางพาราในปัจจุบันมีราคาที่ต่ำเป็นอย่างมาก [3] ทำให้เกษตรกรผู้ปลูกยางพารายังมีความเป็นอยู่ที่ลำบาก ซึ่งหนึ่งในเหตุผลสำคัญที่ส่งผลทำให้ราคาของยางพาราตกต่ำก็คือ ยังขาดการพัฒนาการ การแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางพาราจากน้ำยางธรรมชาติ ดังนั้นการเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายและแปลกใหม่ หรือ เพิ่มคุณสมบัติพิเศษ จะสามารถช่วยเพิ่มการนำน้ำยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์สูงสุด และเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำยางธรรมชาติได้

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่กำลังเป็นที่สนใจของตลาดคือ โฟมยางธรรมชาติ (Natural rubber foam, NRF) หรือโฟมยางพารา (Para rubber foams) เช่น หมอน เบาะรองนั่ง หรือที่นอนยางพารา รวมทั้งแผ่นกรองต่าง ๆ ซึ่งมีความต้องการในท้องตลาดของจีนเป็นอย่างมาก หากสามารถเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์เหล่านี้ได้ ให้มีความแตกต่างออกไปจากการเป็นโฟมยางธรรมดาดังกล่าว น่าจะเป็นหนทางที่ดีในการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราได้ นอกจากนี้ในประเทศไทยยังมีพืชสมุนไพรพื้นบ้านนั่นคือ ขมิ้นชัน (Turmeric) ที่มีหาได้ง่าย มีราคาถูก และคุณสมบัติพิเศษช่วยสมานแผล รักษาโรคผิวหนัง ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา กำจัดกลิ่น เป็นต้น [4,5] ดังนั้นการเติมน้ำขมิ้นชันลงไป ในโฟมยางธรรมดาน่าจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-bacterial) กำจัดกลิ่น ให้กับโฟมยางธรรมชาติได้ นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสมุนไพรพื้นบ้านของประเทศไทยได้

แต่อย่างไรก็ตามการเติมน้ำขมิ้นชันลงไป โฟมยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว อาจจะมีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ไม่เต็มที่ แต่ถ้ามีการเติมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโน (Silver nanoparticles; AgNPs) ลงไปด้วยก็น่าจะช่วยทำให้โฟมยางธรรมชาติมีสมบัติที่โดดเด่นมากยิ่งขึ้น เนื่องจากซิลเวอร์ขนาดนาโนมีคุณสมบัติเด่นในการกำจัดกลิ่น และใช้ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียหรือแม้แต่

เชื้อรา [6,7] โดยทั่วไปซิลเวอร์นาโนนั้นสามารถเตรียมได้หลากหลายวิธีเช่น การยิงด้วยเลเซอร์ การรีดิวซ์ด้วยสารเคมี [8,9] ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ ดังนั้นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนา และอีกทั้งการใช้ไขมันแทนการใช้สารเคมีที่มีความเป็นพิษ เพื่อให้ได้โพลีเมอร์ธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ดีขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติเพื่อสุขภาพที่มีความแปลกใหม่ โดยการเติมน้ำมันชั้นเข้มข้นจากขมิ้นชันสด เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และกำจัดกลิ่นให้กับโพลีเมอร์ธรรมชาติ และทำการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากการใช้น้ำมันเจือจางจากผงขมิ้นชัน เป็นสารรีดิวซ์แทนการใช้สารเคมี ด้วยกระบวนการไมโครเวฟที่มีข้อดีหลายประการคือ สะดวก ง่าย รวดเร็ว และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อนำมาใช้เพิ่มสมบัติการฆ่าเชื้อแบคทีเรียให้กับโพลีเมอร์ธรรมชาติได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ธรรมชาติด้วยกระบวนการดัดแปลงวิธีของดันลอป
- 2) เพื่อทำการเตรียมน้ำมันชั้นเข้มข้นจากขมิ้นชันสด และน้ำมันชั้นผง (Curcumin)
- 3) เพื่อทำการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยน้ำมันผง โดยใช้กระบวนการไมโครเวฟอย่างง่าย
- 4) เพื่อทำการเตรียมผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ธรรมชาติผสม ขมิ้นชัน และอนุภาคซิลเวอร์นาโน
- 5) เพื่อศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน โพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้น และอนุภาคซิลเวอร์นาโน
- 6) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ธรรมชาติทั้งหมดที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติด้วยกระบวนการดัดแปลงวิธีของดันลอป (Modified Dunlop's process)
- 2) ศึกษาผลของเวลาในการตีฟอง ที่มีผลต่อโพลีเมอร์ธรรมชาติ ในเวลาที่แตกต่างกันคือ ได้แก่ 3 5 และ 7 นาที ตามลำดับ
- 3) ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำมันที่ใช้เป็นสารรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออน ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 0.5 1.5 2.5 3.0 และ 3.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการไมโครเวฟ โดยใช้เวลาที่แตกต่างกันคือ 30 60 90 120 150 180 และ 210 วินาที ตามลำดับ

- 4) ศึกษาการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติต่าง ๆ ด้วยเทคนิคดังนี้ คือ
  - 4.1 ตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-vis spectrophotometer, UV-Vis)
  - 4.2 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)
  - 4.3 ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)
  - 4.4 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)
  - 4.5 ตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงเครื่องวิเคราะห์การกระจายและการสะท้อนของแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล (UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy, DRS)
  - 4.6 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาและปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope and energy dispersive x-ray, SEM-EDX)
- 5) ศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติผสมที่เตรียมได้ ได้แก่ การต้านทานแรงดึง (Tensile stress) และ การต้านทานแรงกด (Compressive stress) โดยใช้เครื่องมือ Universal testing machine (UTM)
- 6) ศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโฟมยางธรรมชาติผสมที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการ Agar disc diffusion โดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิดคือ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*) และ เอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli*) ตามลำดับ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้รับองค์ความรู้ในกระบวนการเตรียมโฟมยางธรรมชาติ ด้วยวิธีการดัดแปลงวิธีของต้นลอป
- 2) ได้รับองค์ความรู้ในกระบวนการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยน้ำขมิ้นชัน ด้วยวิธีการไมโครเวฟอย่างง่าย
- 3) ได้รับองค์ความรู้จากเทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ
- 4) สามารถทราบถึงปัจจัยที่ผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบค ของโฟมยางธรรมชาติที่เตรียมได้
- 5) เพิ่มความหลากหลายและมูลค่า ให้กับพืชเศรษฐกิจและพืชสมุนไพรพื้นบ้านของประเทศไทย ได้แก่ ยางพาราและขมิ้นชัน

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน ได้แก่ น้ำยางธรรมชาติ โฟมยางธรรมชาติ ขมิ้นชัน อนุภาคซิลเวอร์นาโน แบคทีเรีย และได้รวบรวมเอกสารทางวิชาการ งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 2.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex)

#### 2.1.1 ยางธรรมชาติหรือยางพารา (Natural rubber or Para rubber)

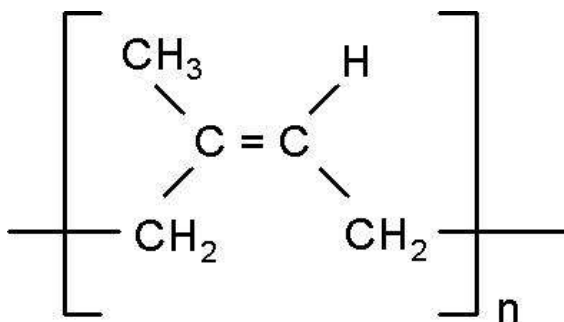
น้ำยางธรรมชาติ หรือน้ำยางพารา หรือน้ำยาง ซึ่งในภาษาละตินคือ Latex หมายถึงของเหลวหรือของไหลที่มีลักษณะคล้ายน้ำนมดังรูปที่ 2.1 มีส่วนประกอบของเนื้อยางและน้ำ ที่ได้จากเนื้อเยื่อของต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ที่มีต้นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิล และแพร่ในทวีปอเมริกาใต้ ก่อนปีพ.ศ. 2000 ชาวอินเดียแดงชนพื้นเมืองในแถบนั้นได้เริ่มใช้น้ำยางพาราด้วยการใช้เท้าจุ่มลงไปใต้น้ำยางดิบเพื่อทำเป็นรองเท้า ทำผ้ากันฝน และทำขวดใส่น้ำ เป็นต้น [10] หลังการเดินทางค้นพบทวีปอเมริกาของ คริสโตเฟอร์ โคลัมบัส ทำให้ทวีปยุโรปได้เริ่มรู้จักกับยางมากขึ้น ในขณะนั้นเมืองพาราเป็นเมืองท่าแห่งหนึ่งในลุ่มน้ำอเมซอนที่รัฐบาลได้ส่งฝ้ายางไปถวายพระเจ้าแผ่นดินประเทศโปรตุเกส ทำให้เริ่มมีการเรียกว่า ยางพารา นับแต่นั้นมา ส่วนในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2442-2444 พระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี หรือ คอซิมบี้ ณ ระนอง ผู้เป็นเจ้าเมืองตรังในขณะนั้น ได้นำต้นยางจากประเทศมาเลเซียเข้ามาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรังเป็นครั้งแรก แล้วชักชวนให้ราษฎรได้ปลูกตาม และในปี พ.ศ. 2454 หลวงราชไมตรี ก็ได้นำต้นยางจากมาเลเซียมาปลูกเป็นสวนยางที่จังหวัดจันทบุรีเช่นกัน ทำให้ประวัติศาสตร์การยางของประเทศไทยได้ยกย่องท่านทั้งสองว่า เป็นผู้ริเริ่มนำต้นยางเข้ามาปลูกในประเทศไทยเป็นคนแรกในคนละฝั่งของอ่าวไทย นับจากนั้นมาสวนยางในประเทศไทยก็ได้ขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว [11]



รูปที่ 2.1 น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพารา [12]

### 2.1.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ความหมายของน้ำยางในทางวิทยาศาสตร์คือ สารพอลิเมอร์ (Polymer) ที่เป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) มีโครงสร้างทางเคมีที่เรียกว่า ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4 polyisoprene) ดังรูปที่ 2.2 เป็นโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ (monomer) ของไอโซพรีน (Isoprene;  $C_5H_8$ ) ต่อเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ขนาดใหญ่ โดย  $n$  แทนด้วยจำนวนไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายโซ่



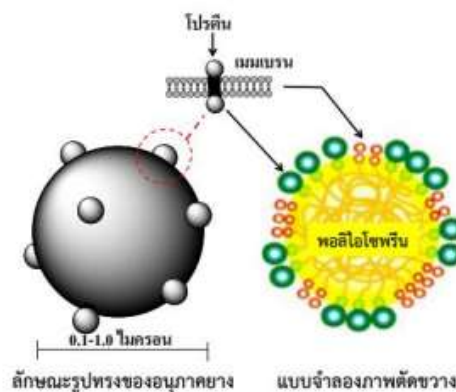
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน [13]

โดยทั่วไปยางธรรมชาติจะมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกเชื่อมขวาง (crosslink) โมเลกุลของยางธรรมชาติจะเกิดผลึก (crystalline) ทำให้สามารถจัดเรียงตัวได้ค่อนข้างเป็นระเบียบ

### 2.1.3 องค์ประกอบของยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 0.98 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ประมาณ 6.8 มีอนุภาคของยางที่เป็นประจุลบกระจายตัวอยู่ทำให้เกิดการผลึกกันตลอดเวลา ทำให้เนื้อยางแขวนลอยและยังคงสภาพเป็นน้ำยางได้ จนกว่าจะมีปัจจัยหรือสภาพแวดล้อมมารบกวนทำให้เกิดการเสถียรภาพจนน้ำยางจับตัวกันเป็นก้อน โดยน้ำยางธรรมชาติจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (เนื้อยางแห้ง) และส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง

ส่วนที่เป็นเนื้อยางหรือเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content; DRC) หมายถึง ปริมาณเนื้อยางที่อยู่ในน้ำยาง จะมีอยู่ประมาณร้อยละ 25 – 45 จะเป็นสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอนหรือซิส-1,4 พอลิไอโซพรีนประมาณร้อยละ 85 เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ลักษณะทรงกลมและทรงรี มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 0.002 – 0.003 ไมครอน มีไขมันและโปรตีนคอยห่อหุ้มโมเลกุลของเนื้อยางเอาไว้ ดังรูปที่ 2.3 และยังมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดง ประมาณร้อยละ 0.5



รูปที่ 2.3 แบบจำลองอนุภาคของยางธรรมชาติ [11]

ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง (Non rubber content) เป็นส่วนประกอบอื่น ๆ ทั้งหมด ที่ไม่ใช่เนื้อยาง ประมาณร้อยละ 65 แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) ส่วนที่เป็นน้ำ หรือเซรัม (Serum) ประมาณร้อยละ 50 ประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและกรดอะมิโน

2) ลูทอยด์ และสารอื่น ๆ ประกอบด้วยโปรตีน ฟอสโฟไลปิด และพอลิฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญทำให้ยางมีสีเหลืองเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ส่วนสารอื่น ๆ นั้นเรียกว่า อนุภาค เฟรย์ วิสลิ่ง (Frey wyssling) ประกอบด้วยสารคาโรตีนอยด์ ที่ทำให้ยางมีสีเหลือง [11]

#### 2.1.4 ชนิดของยางธรรมชาติ

1) น้ำยางข้น (Concentrated latex) เนื่องจากน้ำยางสดมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content) ประมาณร้อยละ 20 – 45 การขนส่งน้ำยางสดจากแหล่งเพาะปลูกไปยังโรงงานอุตสาหกรรมจึงเกิดอุปสรรคในเรื่องความคุ้มค่าในการขนส่งขึ้นเพราะต้องขนส่งส่วนที่เป็นน้ำไปถึงร้อยละ 55 – 80 ซึ่งถือว่าเป็นการสิ้นเปลือง และนอกจากนั้นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ จำเป็นต้องมีปริมาณเนื้อยางแห้งมากกว่าร้อยละ 35 ขึ้นไป ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาให้น้ำยางที่มีความเข้มข้นมากขึ้น เกิดเป็นน้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 ดังรูปที่ 2.4ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ สามารถเตรียมได้ 4 วิธี คือ วิธีการระเหยน้ำ (evaporation) ทำให้เกิดครีม (creaming) แยกออกด้วยขั้วไฟฟ้า (electrodecentration) และการใช้เครื่องปั่น (centrifugation) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด ทำให้แยกส่วนที่เป็นน้ำและเนื้อยางออกจากกัน จนได้น้ำยางข้นชนิดต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ [14] ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.4 น้ํายางธรรมชาติชนิดเข้มข้นร้อยละ 60 [15]

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบในน้ํายางชั้นชนิดต่าง ๆ [14]

ชนิดของน้ํายางชั้น	ร้อยละของยางแห้ง	ร้อยละของปริมาณแอมโมเนีย	ปริมาณของทองแดง (ppm)	ปริมาณของแมงกานีส (ppm)
1.แอมโมเนียสูง (HA)	60	อย่างน้อย 0.6	8	8
2.แอมโมเนียกลาง (MA)	60	0.30 – 0.59	8	8
3.แอมโมเนียต่ำ (LA)	60	ไม่เกิน 0.29	8	8

การเติมแอมโมเนียลงไปนั้นเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้กับน้ํายางชั้น เนื่องจากฟอสโฟไลปิด (phospholipids) ในน้ํายางชั้นจะเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เกิดสารหลายชนิด เช่น กลีเซอรอล (glycerol) และสายโซ่ยาวของคาร์บอกซิเลต (long-chain carboxylate anion) ซึ่งจะถูกดูดซับไปยังผิวของอนุภาคยาง ทำให้อนุภาคยางมีประจุลบ มีผลทำให้ช่วยเสริมสถานะคอลลอยด์ของน้ํายางให้มีความเสถียรมากขึ้นในช่วงการเก็บรักษา

2) ยางแห้ง (Dry rubber) เป็นการนำเอา น้ํายางไปแปรรูปให้กลายเป็นของแข็ง โดยการเติมกรดต่าง ๆ ลงไป เช่น กรดฟอร์มิก กรดซัลฟิวริก หรือกรดแอสติติก ทำให้เนื้อยางแยกตัวออกจากน้ำ เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการรีดด้วยลูกกลิ้ง หรือรมควัน จะได้เป็นผลิตภัณฑ์ยางแผ่นรมควัน ส่วนยางเครฟ ได้จากนำเอาเศษยางไปรีดในเครื่องเครฟ แล้วกำจัดสิ่งสกปรกออก แล้วเติมสารฟอกสีลงไปเพื่อให้ยางมีสีขาวขึ้น [16] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผ่นยางรมควัน (ซ้าย) และยางเครฟ (ขวา) [17,18]

### 2.1.5 คุณสมบัติเด่นและตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ

เนื่องจากยางธรรมชาติประกอบไปด้วยสายโซ่ยาวของพอลิเมอร์ทำใหยางธรรมชาติมีสมบัติที่โดดเด่น ดังต่อไปนี้ มีความยืดหยุ่น (elasticity) และมีความสามารถทนทานต่อแรงดึง หรือการฉีกขาดสูงมาก มีความสามารถในการเหนียวติดกัน มีความต้านทานต่อการขีดถูและความล้าสูง ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีในการผลิตยางรถยนต์ มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก ทนต่อตัวทำละลายที่มีขี้ เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ กรดอ่อน เบสอ่อน สามารถกระด้างกระดองได้สูง

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555 ประเทศไทยมีอัตราการผลิตน้ำยางอยู่ที่ประมาณ 780,000 ตันต่อปี โดยมีตลาดส่งออกที่สำคัญคือ สหรัฐอเมริกา จีนและญี่ปุ่น ซึ่งเป็นประเทศที่มีอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ ในปริมาณประมาณร้อยละ 75 - 80 ของอัตราที่ประเทศไทยผลิตได้ และมีการใช้เองในประเทศเพียงร้อยละ 20 - 25 [19]

ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่สำคัญได้แก่ ยางยานพาหนะ เช่น ล้อรถยนต์ ล้อเครื่องบิน ล้อรถจักรยานยนต์ ทั้งยางนอกและยางใน เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าส่งออกสูงสุดในปี 2552 มีการใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบประมาณร้อยละ 50 โดยเฉลี่ยใช้ประมาณปีละ 155,000 ตัน ยางยืดหรือยางรัดของ ใช้ยางธรรมชาติเป็นส่วนประกอบในการผลิตเฉลี่ยปีละ 90,000 ตัน ถุงมือยางทางการแพทย์ เช่น ถุงมือตรวจโรค และถุงมือผ่าตัด มีการใช้ยางธรรมชาติเป็นส่วนประกอบประมาณ 57,000 ตันต่อปี พื้นรองเท้าและอุปกรณ์กีฬา ใช้ยางธรรมชาติประมาณปีละ 8,400 ตัน สายพานลำเลียงที่ใช้ลำเลียงของหนักชนิดต่าง ๆ ใช้ยางธรรมชาติปีละ 1,300 ตัน ผลิตภัณฑ์ฟองน้ำ มีปริมาณการใช้ยางธรรมชาติ 360 ตัน สื่อการเรียนการสอน แขนเทียมสำหรับฝึกทางการแพทย์ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานก่อสร้างและวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสสะพาน (elastomeric bearings for bridges) แผ่นยางกันน้ำซึม (water stop) ยางกันกระแทก (rubber or rubber bumper) ยางคั่นรอยต่อคอนกรีต (rubber hose for joint of rubber sealant) บล็อกยางปูพื้น (rubber block) แผ่นยางปูอ่างเก็บ

น้ำ (rubber water confine) ฝายยาง (rubber dam) แผ่นยางปูพื้น (rubber floor) หรือการใช้ยางพาราผสมยางมะตอยสำหรับทำผิวถนน เป็นต้น [20]



รูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ยางรัดของ (ซ้าย) ล้อรถยนต์ (กลาง) และหมอน (ขวา) [21-23]

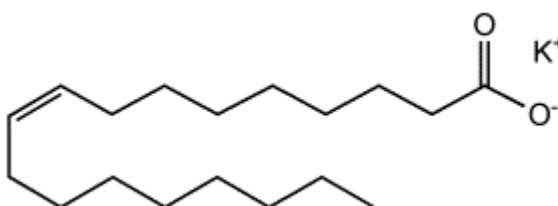
## 2.2 โฟมยางธรรมชาติ (Natural rubber foam)

โฟมยางธรรมชาติหรือยางฟองน้ำ (latex foam rubber) หมายถึง ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งรูพรุนเหล่านั้นเป็นได้ทั้งรูที่ต่อเนื่องหรือต่อเนื่องบ้างหรือไม่ต่อเนื่องบ้างก็ได้ โดยเริ่มผลิตในช่วงปลายปี ค.ศ. 1920 สามารถเตรียมได้จากกระบวนการดันลอป (Dunlop's process) และกระบวนการทาลาเลย์ (Talalay's process)

### 2.2.1 กระบวนการเตรียมโฟมยางธรรมชาติ

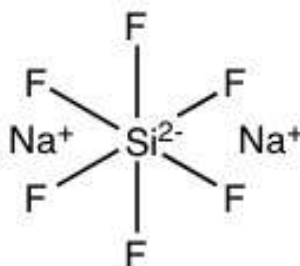
2.2.1.1 กระบวนการดันลอป (Dunlop's process) หรือกระบวนการซิลิโกฟลูออไรด์ (silicofluoride process) ถูกจดสิทธิบัตรไว้ในปี ค.ศ.1930 เป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมผลิตโฟมยางธรรมชาติ โดยมีหลักการที่สำคัญดังต่อไปนี้

- 1) ทำให้น้ำยางเกิดเป็นฟองด้วยการใช้สารที่ทำให้เกิดฟอง (foaming agent) นิยมใช้พวกสบู่คาร์บอกซิเลตชนิด oleates มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นชนิดที่ให้ฟองได้เร็วและฟองมีลักษณะละเอียด



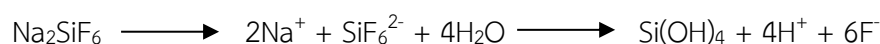
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของโพแทสเซียม โอลิเอต (K-Oleate) [24]

2) เติมสารก่อเจล (primary gelling agent) เช่น เกลือโซเดียม นั่นคือ โซเดียมซิลิโกฟลูออไรด์ (sodium silicofluoride; SSF) ซึ่งมีโครงสร้างเคมีดังรูปที่ 2.8 ทำให้เกิดเจลอย่างช้า ๆ ภายในเวลาที่เหมาะสม มักจะเกิดในสภาวะที่เป็นต่าง



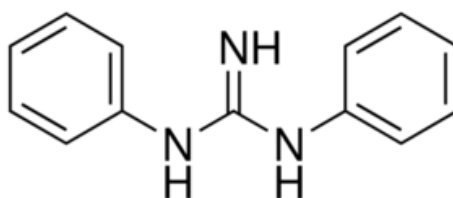
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของโซเดียมซิลิโกฟลูออไรด์ [25]

โดยมีกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของโซเดียมซิลิโกฟลูออไรด์เป็นดังนี้



การไฮโดรไลซิสนี้จะเกิดกรดซิลิซิก (silicic acid;  $\text{Si(OH)}_4$ ) และกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid; HF) ขึ้น ทำให้ไปลดความเสถียรของน้ำยางชั้นร้อยละ 60 ที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย เกิดเป็นเจลขึ้นมาได้ นอกจากนี้ไฮโดรฟลูออริกยังไปรวมตัวกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide;  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เกิดเป็นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (ammonium fluoride;  $\text{NH}_4\text{F}$ ) จะไปทำปฏิกิริยากับซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide;  $\text{ZnO}$ ) ที่ทำหน้าที่เป็นสารตัวกระตุ้นและเป็นสารช่วยในการก่อเจลด้วย เกิดเป็นสบู่ซิงค์ที่ไม่ละลาย (insoluble zinc soap) หรือ สบู่กรดที่ละลายในน้ำมัน (oil-soluble acid soap) ซึ่งจะไปแยกเอาสบู่ที่ห่อหุ้มอนุภาคยางในน้ำยางออก ทำให้น้ำยางมีความเสถียรลดลง เกิดเป็นเจลขึ้น

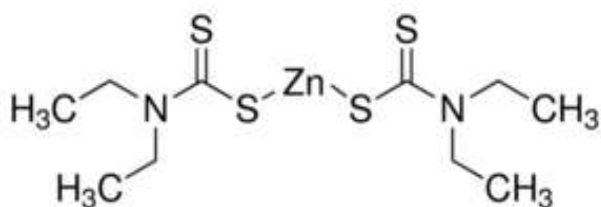
บางกรณีอาจมีการใช้สารเสริมการก่อเจล (secondary gelling agent) เช่น ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenylguanidine; DPG) ซึ่งมีโครงสร้างเคมีดังรูปที่ 2.9 เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการเกิดเจล (gell sensitizers) ช่วยให้น้ำยางเกิดเจลก่อนที่ฟองจะยุบตัว



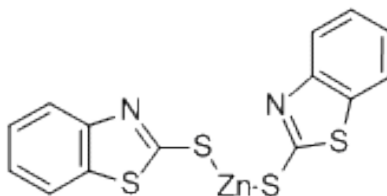
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของไดฟีนิลกัวนิดีน [26]

- 3) เทฟองยางขณะที่ยังเหลวลงในแม่พิมพ์ตามรูปร่างที่ต้องการ
- 4) ปลอ่ยให้ฟองยางเซ็ดตัวที่อุณหภูมิปกติ

5) ทำให้เจลของฟองยางคงรูป (vulcanizing) ด้วยระบบกำมะถันซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางกับสารตัวเร่งหลัก (primary accelerators) เช่น ซิงค์ไดเอทิลไดไทโकार์บารเมท (zinc diethyldithiocarbamate; ZDEC) มีโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 2.10 เพื่อใช้เร่งการเกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) เนื่องจาก ZDEC มีคุณสมบัติการเกิดปฏิกิริยาที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้ค่อนข้างว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา หากใช้เพียงลำพังจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางในแต่ละบริเวณของชิ้นงานไม่สมบูรณ์ จึงต้องมีการใช้ร่วมกับสารตัวเร่งรอง (secondary accelerators) เช่น ซิงค์ ทุเมอร์แคปโทเบนโซโซเลท (zinc 2-mecaptobenzthiozolate; ZMBT) มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.11 เพื่อให้การเชื่อมขวางเกิดขึ้นในแต่ละบริเวณของชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ที่สุด



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของซิงค์ไดเอทิลไดไทโकार์บารเมท [27]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของซิงค์ ทุเมอร์แคปโทเบนโซโซเลท [28]

6) ล้างทำความสะอาดผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ได้เพื่อกำจัดสารเคมีที่ยังหลงเหลือตกค้างอยู่ แล้วนำไปอบแห้ง

2.2.1.2 กระบวนการทาลาเลย์ (Talalay's process) มาจากชื่อของผู้คิดค้นกระบวนการนี้คือ J.A.A. and L Talalay ในช่วงปี ค.ศ. 1950 ซึ่งกระบวนการนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับกระบวนการต้นตอในบางส่วน โดยเริ่มจากการทำให้น้ำยางเกิดฟอง แล้วใช้สุญญากาศทำให้ขยายตัวในแม่พิมพ์ ทำให้ฟองยางเกิดเป็นเจลและคงรูป จากนั้นจึงล้างและอบแห้ง โดยในแต่ละขั้นตอนจะมีความแตกต่างกับกระบวนการต้นตอบ้าง กระบวนการทาลาเลย์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การทำให้น้ำยางเกิดเป็นฟองยาง จะใช้ enzyme catalyst ซึ่งมาจากยีสต์จะไปเร่งการสลายของไฮโดรเจนเพอรอกไซด์ที่ละลายอยู่ใน latex aqueous phase แล้วได้ออกซิเจนไปขยายน้ำยางจนเกิดเป็นฟองยางเกิดขึ้น ต่อมาได้มีการปรับปรุงการเกิดฟองยางขึ้นโดยใช้เครื่องกลร่วมกับสุญญากาศ (vacuum expansion)

2) ฟองยาง (pre-foam) ที่ได้จะถูกขังน้ำหนักรักษาเพื่อควบคุมความหนาแน่น แล้วใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วทำให้เกิดสุญญากาศ ทำให้ฟองยางสามารถขยายตัวได้เต็มแม่พิมพ์ โดยที่ไม่มีการใช้สารก่อเจลเหมือนกับกระบวนการดันลอป และสิ่งที่แตกต่างที่สำคัญคือกระบวนการทาลาเลย์จะมีการใช้สารหล่อลื่น (internal lubricant) ผสมลงไปกับ pre-foam ก่อนที่จะเทลงไปในแม่พิมพ์ เนื่องจากแม่พิมพ์ในกระบวนการทาลาเลย์นั้นมีความซับซ้อนเนื่องจากมีเดือยจำนวนมาก จึงยากที่จะทำให้สารหล่อลื่นเคลือบแม่พิมพ์อย่างทั่วถึง

3) เมื่อการขยายตัวของฟองยางภายในแม่พิมพ์สมบูรณ์แล้ว ของผสมไกลคอลเย็น (cold glycol/water) จะไหลผ่านเข้าช่องของแม่พิมพ์ ทำให้ฟองยางเย็นจนแข็งตัว (freeze the foam) เกิดเป็นยางฟองน้ำลักษณะแบบรูพรุนเปิด (open foam)

4) การคงรูปของฟองยางเกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิให้กับของผสมไกลคอลจนอุณหภูมิสุดท้ายเป็น 110 องศาเซลเซียส และยังทำให้เกิดการฟอร์มตัวใหม่ (reform) ของโพลีเอทิลีน โอลิเอต ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้การลอกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ทำได้ง่ายขึ้น



5) ล้างทำความสะอาดและอบแห้งเช่นเดียวกับกระบวนการดันลอป

## 2.2.2 ลักษณะของโฟมยางธรรมชาติ

ลักษณะของโฟมยางธรรมชาติที่ได้จากทั้ง 2 กระบวนการนั้นมีความแตกต่างกันทั้งรูปร่างและคุณสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะและคุณสมบัติของโฟมยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากกระบวนการดันลอป และทาลาเลย์ [29]

	กระบวนการดันลอป	กระบวนการทาลาเลย์
ความสม่ำเสมอของความนิ่ม-แข็ง	ความนิ่มไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาของโฟมยาง โดยด้านล่างจะแข็งกว่าข้างบน	ความนิ่มสม่ำเสมอตลอดทั้งความหนาของชิ้นงาน
ความแข็งแรง	สามารถควบคุมได้จากระยะเวลาการตีฟอง หากตีฟองนาน จะได้ฟองมาก ทำให้ได้ชิ้นงานที่นิ่ม หรือหากตีฟองไม่นาน จะได้ฟองน้อย ทำให้ได้ชิ้นงานที่แข็งแรง	ไม่สามารถผลิตเป็นโฟมยางที่มีความแข็งแรงได้ เนื่องจากมีการใช้สุญญากาศ ทำให้ได้โฟมยางที่นิ่ม
น้ำหนัก (ที่ความแข็งเท่ากัน)	น้ำหนักมากกว่า	น้ำหนักน้อยกว่า
ความสามารถในการกระด้าง	สามารถกระด้างได้น้อยกว่า	สามารถกระด้างได้มากกว่า
ความคงทน	มีความคงทนมากกว่า	มีความคงทนน้อยกว่า

	กระบวนการดันตอป	กระบวนการทาลาเลย์
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า	มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงในการทำสุญญากาศ และมีการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ต้นทุน	ถูกกว่า	แพงกว่า
ลักษณะโฟมยางธรรมชาติที่ได้ [30]		

จากการเปรียบเทียบข้างต้นจะเห็นได้ว่า กระบวนการเตรียมโฟมยางธรรมชาติแบบกระบวนการดันตอปถึงแม้ว่าความสม่ำเสมอของความนิ่มแข็งจะไม่เท่ากัน แต่กระบวนการนี้ก็สามารถควบคุมความนิ่มแข็งของโฟมยางธรรมชาติได้ นอกจากนี้ยังประหยัดเวลา พลังงาน และต้นทุนได้ดีกว่า และที่สำคัญคือเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการดันตอปในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติ

## 2.3 ขมิ้นชัน (Turmeric)

ขมิ้นชันถือได้ว่าเป็นพืชสมุนไพรท้องถิ่นที่หาได้ทั่วไปในประเทศไทย แต่อาจมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไปตามแต่ละภูมิภาคของไทย มีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก มีสรรพคุณหลากหลายด้าน

### 2.3.1 ข้อมูลทั่วไปของขมิ้นชัน

ขมิ้นชัน หรือ ขมิ้น เป็นพืชไม้ล้มลุกตระกูลเดียวกับขิง ความสูงประมาณ 30 – 90 เซนติเมตร มีแขนงรูปทรงกระบอกแตกออก 2 ข้าง ใบเดี่ยวกว้าง 12- 15 เซนติเมตร กว้าง 30-40 เซนติเมตร และมีดอกช่อสีขาวเขียวแทงออกจากเหง้าที่อยู่ใต้ดินดังรูปที่ 2.12 ขมิ้นชันมีต้นกำเนิดอยู่ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ส่วนมากจะใช้ประโยชน์จากเหง้าที่อยู่ใต้ดิน ซึ่งมีสีเหลืองส้ม มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว ในภาคกลางของไทยมักเรียกว่า ขมิ้นชัน ทางภาคเหนือเรียกแตกต่างกันออกไปคือ ขมิ้นหยอก ตายอ สะยอ ส่วนภาคใต้ันั้นเรียกว่า ขมิ้น หมิ้น เป็นต้น [31]



รูปที่ 2.12 ต้นและหัวขมิ้นชัน [31]

ขมิ้นชันมีชื่อสามัญคือ Turmeric มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Curcuma longa* Linn. เนื้อในของเหง้าจะเป็นสีเหลืองถึงสีแดงจัด มีกลิ่นเฉพาะตัว มีประวัติการนำขมิ้นมาใช้งานมานานมากกว่า 5,000 ปี ปัจจุบันในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยยังนิยมนำไปใช้ในการประกอบอาหาร แต่งสี หรือแต่งกลิ่น โดบใช้ขมิ้นในรูปแบบผงขมิ้นดังรูปที่ 2.13 ให้กับอาหารด้วย เช่น แกงไตปลา แกงกะหรี่ ข้าวหมกไก่ ขนมเบื้องญวน เป็นต้น เนื่องจากขมิ้นชันอุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ หลายชนิด เช่น วิตามินเอ วิตามินบี1 วิตามินบี3 วิตามินซี วิตามินอี แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก รวมไปถึงเส้นใย คาร์โบไฮเดรต และโปรตีน นอกจากนี้ในเหง้าขมิ้นยังมีน้ำมันหอมระเหย และสารสีเหลืองส้มที่เรียกว่า เคอร์คูมินอยด์ [32]

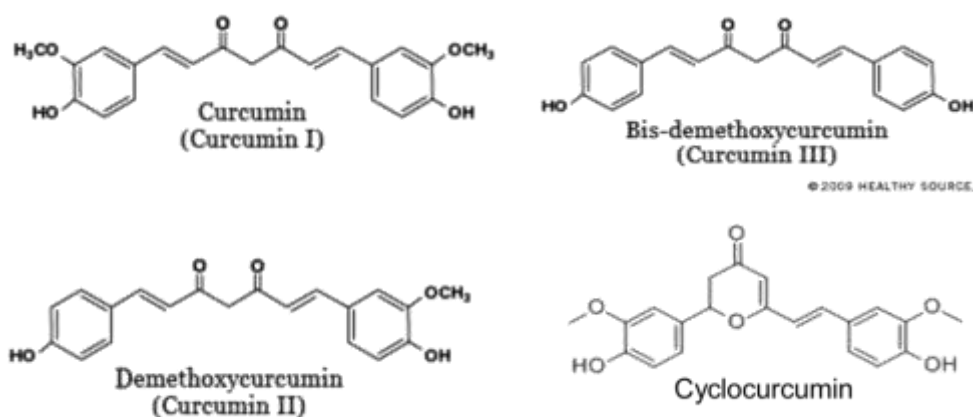


รูปที่ 2.13 ผงขมิ้นชัน [31]

### 2.3.2 สารเคมีในขมิ้นชัน

ในเหง้าของขมิ้นชันจะมีสารเคมีที่เรียกว่า เคอร์คูมินอยด์ (Curcuminoids) เป็นสารพอลิฟีนอลที่มีสีเหลืองอมส้ม ละลายน้ำได้น้อยแต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายไดเมทิล ซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO) อะซีโตน และเอทานอล ซึ่งอยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) มีทั้งรูปเอนอลและรูปคีโต (enol-keto form) ซึ่งรูปเอนอลจะคงตัวในสภาวะของแข็ง

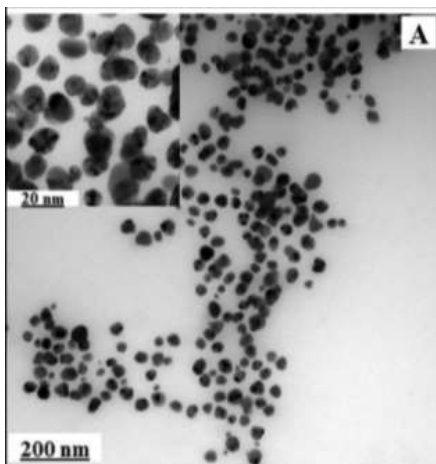
และของเหลวได้ดี [33] มีสารประกอบหลัก 4 ชนิดประกอบไปด้วย เคอร์คูมิน (curcumin) ร้อยละ 77, ดีเมทอกซีเคอร์คูมิน (demethoxycurcumin) ร้อยละ 17, บิสดีเมทอกซีเคอร์คูมิน (bis-demethoxycurcumin) ร้อยละ 5 และ ไฮโคเคอร์คูมิน (cyclocurcumin) ร้อยละ 1 โดยมีโครงสร้างเคมีดังรูปที่ 2.13 ในทางเภสัชวิทยาพบว่าสารในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติในการรักษาบาดแผล ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ต้านทานการอักเสบ และอนุมูลอิสระได้ดี จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านอาหาร เครื่องสำอาง และยา ส่วนในทางการแพทย์ได้มีการนำมารักษาอาการโรคมะเร็งต่าง ๆ เช่น มะเร็งลำไส้ใหญ่ มะเร็งลำไส้เล็กส่วนต้น มะเร็งกระเพาะอาหาร เป็นต้น [34]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของเคอร์คูมินอยด์ [35]

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าสารในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์มีลักษณะเป็นไดฟีนิลเฮปทานอยด์แบบเส้นตรง (linear diphenylheptanoids) ประกอบด้วยวงอะโรมาติกจำนวน 2 วง เชื่อมกันด้วยสายโซ่ตรงของคาร์บอนจำนวน 7 อะตอม แต่จะแตกต่างกันตรงที่จำนวนของหมู่เมทอกซี (methoxy) โดยเคอร์คูมินจะมีอยู่ 2 หมู่ แต่ออนุพันธ์ของเคอร์คูมินนั้นคือ ดีเมทอกซีเคอร์คูมิน และบิสดีเมทอกซีเคอร์คูมิน จะมีจำนวนของหมู่เมทอกซีอยู่ 1 และไม่มีเลย ตามลำดับ ส่วนไฮโคเคอร์คูมินนั้นจะไม่หมู่เมทอกซีเช่นเดียวกับบิสดีเมทอกซีเคอร์คูมิน แต่ที่ปลายของวงอะโรมาติกทั้งสองข้างจะปรากฏออกซิเจนข้างละ 1 อะตอม

สารในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์นั้นมีความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยงานวิจัยของ Alsammarraiea และคณะ [52] ได้ใช้สารสกัดจากขมิ้นเพื่อใช้เป็นตัวรีดิวซ์ และตัวเพิ่มเสถียรภาพให้กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 5 – 35 นาโนเมตร และมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่  $18 \pm 0.56$  นาโนเมตรดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพถ่ายจากกล้อง TEM ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากสารในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ [52]

## 2.4 อนุภาคซิลเวอร์นาโน (Silver nanoparticles)

### 2.4.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับซิลเวอร์นาโน

ซิลเวอร์ หรือ เงิน หรือภาษาละตินคืออาร์เจนตัม (Argentum) คือธาตุที่มีเลขอะตอม 47 มีสัญลักษณ์คือ Ag เป็นโลหะทรานซิชันสีขาวเงิน นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก ค้นพบโดย โรเบิร์ต แบนฟอร์ด มักนำไปใช้ประโยชน์ในการทำเหรียญ เครื่องประดับ ภาชนะบนโต๊ะอาหาร ในยุคอาณาจักรกรีกโบราณมักใช้ทำภาชนะในการเก็บรักษาน้ำ เพื่อให้ปราศจากเชื้อโรคและป้องกันโรคภัยไข้เจ็บ ในทวีปยุโรปเมื่อหลายร้อยปีก่อน มักจะมีการโยนเหรียญเงินลงไปในถังนมเพื่อให้เก็บรักษาน้ำนมได้นานขึ้น หลังจากนั้นมามีการศึกษาพบว่าธาตุเงินสามารถฆ่าเชื้อโรคต้นเหตุของอาการเจ็บป่วยได้

อนุภาคซิลเวอร์นาโน คือ การทำให้อนุภาคของซิลเวอร์เล็กด้วยกระบวนการต่าง ๆ ให้อยู่ในระดับนาโนเมตร คือไม่เกิน 100 นาโนเมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการที่จะสัมผัสกับเชื้อโรค และด้วยขนาดที่เล็กมากจึงทำให้ใช้ซิลเวอร์เพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกับเชื้อโรคได้มากขึ้น [36]

### 2.4.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน

การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถทำได้ 3 วิธี คือ วิธีทางเคมี (chemical approach) วิธีทางกายภาพ (physical approach) แบ่งออกเป็น การยิงด้วยเลเซอร์ (laser ablation) และ การใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave assisted) และสุดท้ายคือวิธีการทางชีวภาพ (biological approach) โดยวิธีการที่ต่างกัันก็จะให้รูปร่างที่ต่างกััน เช่น ทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยม หรือพีระมิด นอกจากนั้นขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้ก็จะต่างกัันด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ อีกด้วย

### 2.4.2.1 วิธีการทางเคมี (chemical approach)

เป็นวิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก ควบคุมรูปร่างและขนาดได้ง่าย มีองค์ประกอบ 3 ส่วนคือ

- 1) เกลือซิลเวอร์ (silver salt) เป็นแหล่งของซิลเวอร์ไอออน ( $\text{Ag}^+$ ) เช่น ซิลเวอร์ไนเตรต
- 2) ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนกับซิลเวอร์ไอออน ในสารละลายให้กลายเป็น  $\text{Ag}^0$  หรือ อนุภาคซิลเวอร์นาโนนั่นเอง เช่น sodium citrate, ascorbate, sodium borohydride ( $\text{NaBH}_4$ ), elemental hydrogen, polyol process, Tollens reagent และ N, N-dimethylformamide (DMF)
- 3) สารให้ความคงตัว (stabilizer) หรือ capping agent ส่วนมากจะใช้สารจำพวกพอลิเมอร์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและป้องกันการกลับมารวมกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโน เช่น poly(vinyl alcohol), polyvinylpyrrolidone, poly(ethyleneglycol), poly(methacrylic acid) และ poly(methylmethacrylate) เป็นต้น

จะเห็นได้ว่าจากองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนนี้จะเป็นการใช้สารเคมีค่อนข้างมาก ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ยังมีความเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และมีต้นทุนการผลิตที่สูง อีกทั้งยังมีการพบว่าสารเคมีเหล่านี้มีโอกาสปนเปื้อนบนพื้นผิวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนอีกด้วย [37]

### 2.4.2.2 วิธีการทางกายภาพ (physical approach)

เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมเช่นกัน โดยเป็นการทำให้โลหะซิลเวอร์ลดขนาดลงจนเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง ควบคุมขนาด รูปร่าง และปริมาณได้ง่าย แต่ข้อเสียคือ เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ค่อนข้างราคาแพง และในกระบวนการยังใช้พลังงานสูงอีกด้วย

#### - วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (laser ablation)

เป็นการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยการยิงเลเซอร์ใส่โลหะเงินในสารละลาย เพื่อให้โลหะเงินมีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับนาโนเมตรที่ค่อนข้างมีความบริสุทธิ์สูง แล้วตกลงไปในสารละลายของสารให้ความคงตัว (stabilizer) ส่วนใหญ่เป็นพวกพอลิเมอร์เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคขนาดนาโนที่ได้จากการยิงเลเซอร์กลับมารวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยรูปร่างและขนาดของอนุภาคนาโนที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่กระทบกับโลหะ ระยะเวลาจังหวะ (pulse) ของเลเซอร์ ระยะเวลาการยิงเลเซอร์ซึ่งมีผลกับความเข้มข้นและสัญญาณรบกวนของอนุภาคนาโนที่ได้ และอัตราการยิงของเลเซอร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด โดยพบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการยิงเลเซอร์

#### - วิธีการใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave assisted)

เป็นการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นใช้หลักการทำให้สารละลายที่มีซิลเวอร์ไอออน ตัวรีดิวซ์และสารให้ความคงตัว เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว จนทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เกิดเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ดังนี้ ซิงซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate,  $\text{AgNO}_3$ ) 0.3 กรัม และพอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone, PVP) 0.3 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 10 และ 15 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นเทสารทั้งสองแล้วปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นนำไปเข้าเครื่องไมโครเวฟกำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 210 วินาที โดยทุก ๆ 15 วินาทีจะนำออกมาคนเพื่อลดความเดือดและกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอ เมื่อครบเวลาสารละลายจะเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล แสดงว่าเกิดเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนในลักษณะคอลลอยด์แล้ว [38] โดยกระบวนการไมโครเวฟนี้มีข้อดีคือ ง่าย สะดวก รวดเร็ว ได้สารที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ และที่สำคัญคือเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

#### 2.4.2.3 วิธีการทางชีวภาพ (biological approach)

จากปัญหาได้ความอันตรายจากสารเคมีและความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจากกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจากทั้งกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกายภาพ ปัจจุบันเริ่มมีความสนใจในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีการทางชีวภาพมากขึ้น เนื่องจากสามารถลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษลง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย โดยสามารถใช้แบคทีเรีย เชื้อรา ยีสต์ หรือสารสกัดจากพืชมาสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ ยังคงมีส่วนประกอบหลักในการสังเคราะห์ 3 ส่วนเช่นเดียวกับกระบวนการเคมี คือ 1) สารละลายตัวกลางที่มีเกลือของซิลเวอร์อยู่ 2) ตัวรีดิวซ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และ 3) สารให้ความคงตัวที่ไม่เป็นพิษ

ข้อดีของกระบวนการทางชีวภาพคือ ลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษลง เนื่องจากในสารชีวโมเลกุลที่อยู่ในจุลินทรีย์หรือสารสกัดจากพืชสามารถเป็นได้ทั้งตัวรีดิวซ์และสารให้ความคงตัว ส่งผลทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย แต่ข้อเสียคือการควบคุมรูปร่าง ขนาด และความเป็นผลึกค่อนข้างทำได้ยาก เมื่อเปรียบเทียบการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจากใช้เชื้อจุลินทรีย์กับการใช้สารสกัดจากพืช พบว่าการใช้สารสกัดจากพืชมีขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยากทั้งในแง่ของระยะเวลา เครื่องมือ และความเป็นพิษ เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ต้องใช้ทั้งเวลาในการเพาะเลี้ยงเชื้อ และใช้เครื่องมือจำเพาะ นอกจากนั้นยังต้องมีการคอยควบคุมเชื้อไม่ให้เกิดการแพร่ระบาด ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม [37]

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น งานวิจัยนี้จึงได้เลือกวิธีการทางชีวภาพคือ การใช้สารสกัดจากขมิ้นชันที่เป็นสมุนไพรพื้นบ้านของประเทศไทย หาได้ง่าย และราคาถูก มาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาค

ซิลเวอร์นาโนรวมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ เพื่อลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษลง ลดการใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง ประหยัดพลังงาน ลดต้นทุนการผลิต สะดวก รวดเร็ว และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

### 2.4.3 กลไกการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน

ปัจจุบันนักวิจัยกำลังให้ความสนใจในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจากสารสกัดจากพืชมากขึ้น ด้วยเหตุผลทางสิ่งแวดล้อมข้างต้นตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น แม้ว่าจะยังไม่สามารถทราบกลไกในการสังเคราะห์ได้อย่างชัดเจน แต่ก็ก็มีข้อสันนิษฐานว่าสารประกอบที่อยู่ในสารสกัดจากพืชเช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน พอลิแซ็กคาไรด์ กรดอินทรีย์ มีส่วนช่วยในการรีดิวซ์และทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว เนื่องจากสารเหล่านี้มีหมู่ไฮดรอกซิล คาร์บอนิล และเอมีน ซึ่งสามารถยึดแน่นได้จากผลจากการศึกษาด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีบทบาทในการรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนให้กลายเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว ป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคซิลเวอร์นาโน จนกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

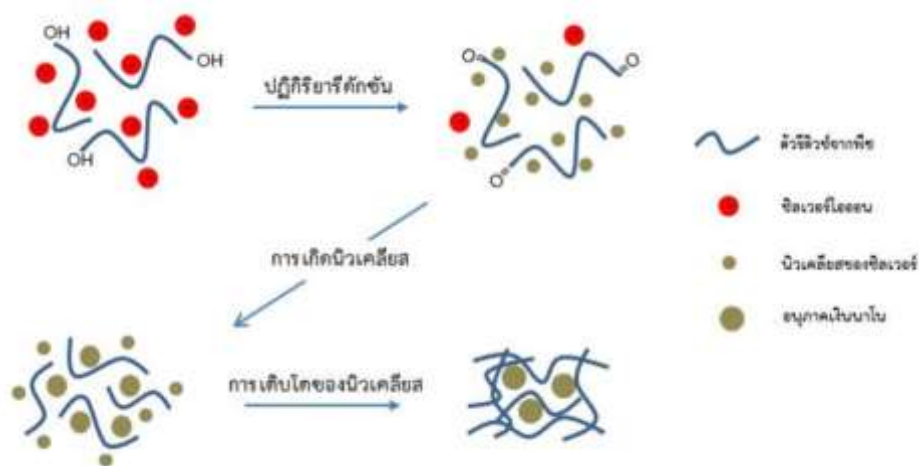
โดยสารประกอบจำพวกฟีนอลิก (phenolic compound) เป็นโมเลกุลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์แล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปคลิโนน พร้อมกับปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีหน้าที่รีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนให้กลายเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ ดังรูปที่ 2.16



**รูปที่ 2.16** การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารประกอบฟีนอลิกเป็นสารประกอบคลิโนน เพื่อใช้ในการรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนให้กลายเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน [39]

โดยกลไกการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.17 ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้ 1) ซิลเวอร์ไอออนในสารละลายจะถูกรีดิวซ์ โดยอิเล็กตรอนจากสารสกัดจากพืช แล้วเกิดเป็นนิวคลีไอเซ็น 2) นิวคลีไอที่เกิดขึ้นเริ่มเติบโตขึ้นกลายเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน 3) ระหว่างที่นิวคลี

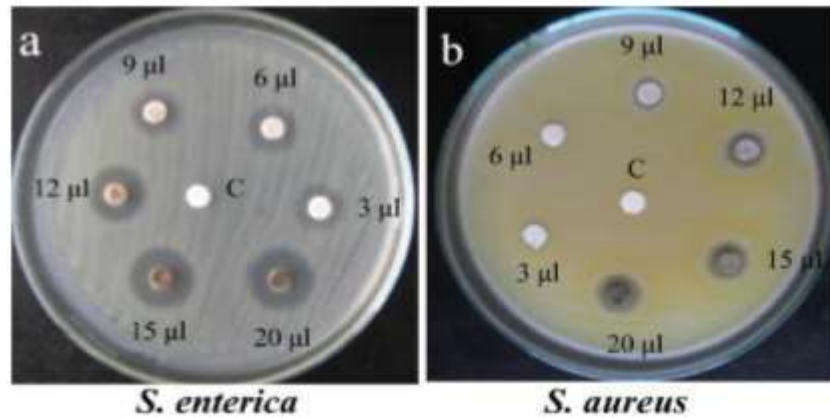
ไอเดบโทขึ้นจะเกิดการรวมตัวเป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น ทรงกลม ทรงสามเหลี่ยม ทรงพีระมิด เป็นต้น นอกจากนี้สารสกัดจากพืชยังทำหน้าที่ช่วยให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีความเสถียรอีกด้วย



รูปที่ 2.17 กลไกอย่างง่ายในการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากสารสกัดจากพืช [37]

#### 2.4.4 กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

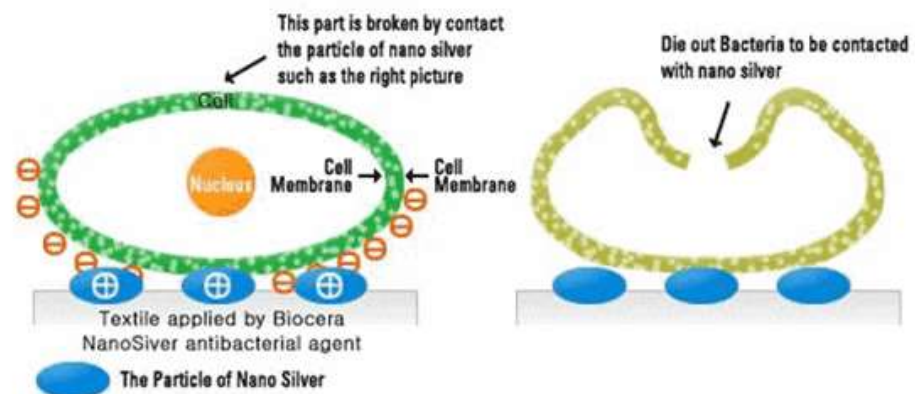
ในอดีตได้มีการนำเอาเหรียญเงินโยนลงไปใบบ่อน้ำ หรือถังนม เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคต่าง ๆ เนื่องจากเงินสามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ ดังที่ได้กล่าวไปนั้น ในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้ประโยชน์จากธาตุเงินอยู่ แต่เพียงลดขนาดอนุภาคลงให้อยู่ในระดับนาโนเมตร เนื่องจากจะทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้นไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย เชื้อรา หรือไวรัส ทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนถูกนำไปใช้งานหลากหลาย เช่น เคลือบบนผ้าปิดแผลหรือเส้นใยผ้า เคลือบลงบนอุปกรณ์ทางการแพทย์ เพื่อป้องกันการติดเชื้อ ผสมในผงซักฟอก น้ำยาล้างมือ สบู่ และผสมลงในกระดาดอาหาร ความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์มักจะใช้วิธี agar disc diffusion ในการวัดความสามารถจากขอบเขตการยับยั้ง (clear zone) ถ้าอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้มากจะทำให้เกิดขอบเขตการยับยั้งขนาดใหญ่ตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น Das และคณะ [40] ได้ศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากใบแค (*Sesbania grandiflora*) พบว่าสามารถต้านเชื้อ *Salmonella enterica* (gram-negative) และ *Staphylococcus aureus* (gram-positive) โดยสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบได้ดีกว่า สังเกตได้จากขอบเขตของการยับยั้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่า ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ขอบเขตการยับยั้งเชื้อ (a) *Salmonella enterica* และ (b) *Staphylococcus aureus* ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน [40]

โดยนักวิจัยได้เสนอกฎในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียไว้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังนี้

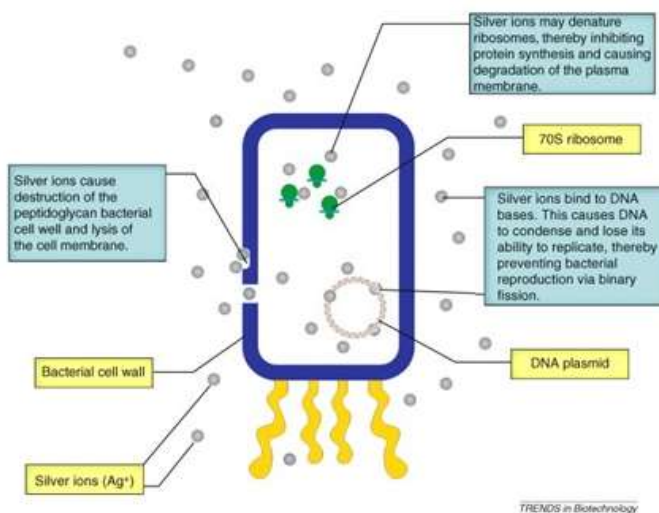
1) เมื่ออนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ไปสัมผัสกับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย อนุภาคซิลเวอร์นาโนจะค่อย ๆ แทรกตัวเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้ผนังเซลล์เกิดความเสียหาย เกิดการรั่วของผิวเซลล์และมีการสะสมของอนุภาคซิลเวอร์นาโน จนเป็นสาเหตุทำให้เซลล์ของแบคทีเรียตายไปในที่สุด [37] ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 อนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ไปสัมผัสกับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย จนทำให้แบคทีเรียตายจากการรั่วของผิวเซลล์ [41]

2) เมื่ออนุภาคซิลเวอร์นาโนสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย ทำให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระ (free radical) ขึ้นมา ซึ่งมีความสามารถในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ ทำลายสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ ทำให้เซลล์ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ จนตายไปในที่สุด [37]

3) อนุภาคซิลเวอร์นาโนเมื่อสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย จะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนบนเยื่อหุ้มเซลล์ แล้วไปเกิดปฏิกิริยากับโปรตีนต่อ ทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดการปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ซึ่งเป็น soft base จากนั้นซิลเวอร์ไอออนจะไปทำปฏิกิริยากับ soft acid นั่นคือซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของดีเอ็นเอ นอกจากนี้ยังไปรบกวนการทำงานของไมโทคอนเดรียให้ผิดปกติ จนก่อให้เกิดอนุมูลอิสระชนิด ROS (reactive oxygen species) ส่งผลกระหนาบต่อการหายใจของเซลล์ และการสร้างพลังงานเอทีพี (ATP) จนทำให้แบคทีเรียตายไปในที่สุด [37,41] ดังรูปที่ 2.20

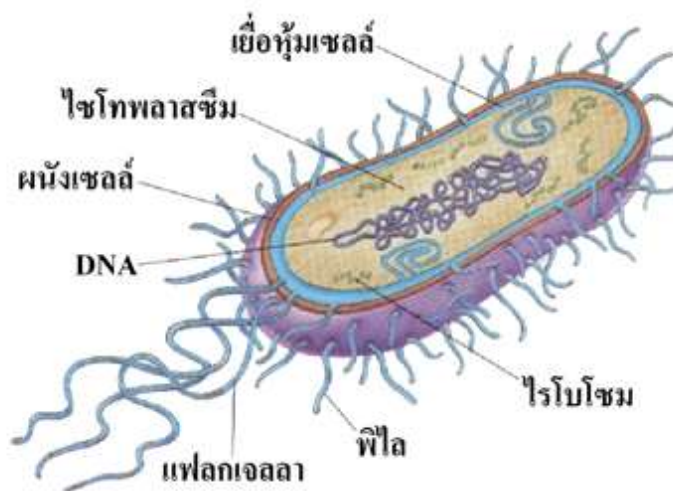


รูปที่ 2.20 การปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออนจากซิลเวอร์นาโน ที่เป็นสาเหตุในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย [41]

## 2.5 แบคทีเรีย (Bacteria)

แบคทีเรีย หรือ แบคทีเรีย คือ ประเภทของสิ่งมีชีวิตประเภทใหญ่ประเภทหนึ่ง เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว มีโครงสร้างเซลล์ไม่ซับซ้อนมาก สามารถมีชีวิตอยู่ได้ด้วยตัวมันเอง ขนาดเล็กมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น สามารถเพิ่มจำนวนด้วยการขยายพันธุ์แบบทวิคูณได้ โดยไม่ต้องอาศัยเพศผู้และเพศเมีย จัดอยู่ในกลุ่มโพรคาริโอต (prokaryote) ที่มีส่วนประกอบเหมือนกับเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทั่วไป เพียงแต่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส ประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก ดังนี้

1) ผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ เปรียบได้เป็นโครงกระดูกของแบคทีเรีย อยู่ชั้นนอกสุดและมีความแข็งแรง ทำหน้าที่ค้ำจุนรูปร่างและลักษณะของแบคทีเรียเอาไว้ไว้ ซึ่งจะมีความแตกต่างกันไปตามแต่ละสปีชีส์ของแบคทีเรีย ถัดเข้ามาจะเป็นเยื่อหุ้มบาง ๆ เรียกว่า เยื่อหุ้มเซลล์ ทำหน้าที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนน้ำและสารอาหารต่าง ๆ ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ให้เหมาะสม ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 โครงสร้างและส่วนประกอบของแบคทีเรีย [42]

2) ไซโทพลาสซึม จากรูปที่ 2.21 ไซโทพลาสซึมจะอยู่ถัดเข้าไปจากเยื่อหุ้มเซลล์ภายในประกอบด้วยสารอาหารต่าง ๆ เช่น แป้ง ไขมัน โปรตีน และเอนไซม์ ที่สำคัญในการดำรงชีวิต นอกจากนี้ยังมีดีเอ็นเอที่ใช้ในการควบคุมการดำรงชีวิตและการสืบพันธุ์ของแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์ไว้อีกด้วย

แต่แบคทีเรียบางสายพันธุ์ที่สามารถทนต่อสภาวะที่ สุดโต่ง นั่นคือทนความร้อน ความเย็น ความชื้น และปราศจากอาหาร แล้วสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้หลายปีนั้นเป็นเพราะแบคทีเรียสายพันธุ์เหล่านั้นมีความสามารถในการสร้างผนังเซลล์ที่หนากว่าปกติมาล้อมรอบตัวหรือเรียกว่า สปอร์หรือแคปซูล

### 2.5.1 ประเภทของแบคทีเรีย

แบคทีเรียสามารถแบ่งออกได้โดยใช้ 3 เกณฑ์ดังต่อไปนี้

**2.5.1.1 แบ่งตามการใช้ออกซิเจน** โดยแบ่งการใช้เกณฑ์เรื่องอากาศในการดำรงชีวิต แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

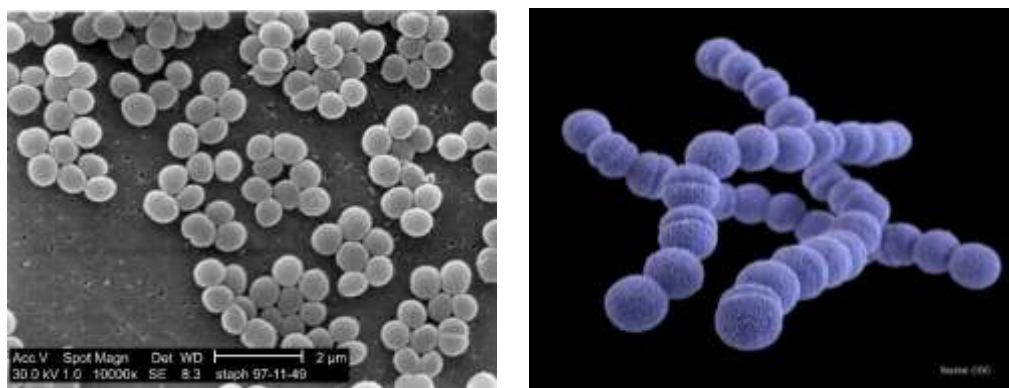
1) แอโรบส์ (Aerobe) เป็นแบคทีเรียที่จำเป็นต้องใช้อากาศในการเผาผลาญอาหารให้เป็นพลังงานเพื่อใช้ในการดำรงชีวิต ถ้าขาดอากาศก็จะไม่เจริญเติบโตหรือตายไปในที่สุด ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่จะเป็นพวกแอโรบส์

2) แอนแอโรบส์ (Anaerobe) เป็นแบคทีเรียที่ไม่จำเป็นต้องใช้อากาศก็สามารถมีชีวิตอยู่ได้ แต่จะตายเมื่อถูกอากาศ แบคทีเรียเหล่านี้มักอาศัยอยู่ตามบริเวณที่อากาศน้อย หรือที่อับทึบต่าง ๆ เช่น ช่องท้อง ในปาก ในร่างกาย สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นสาเหตุในด้านโรคติดเชื้อต่าง ๆ

3) ฟาคัลเททีฟ (Facultative) เป็นแบคทีเรียที่สามารถอยู่ได้ทั้งสภาวะที่มีอากาศและไม่มีอากาศ เช่น *Escherichia coli* หรือ เรียกกันว่า อีโคไล (*E. coli*) เป็นแบคทีเรียที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์

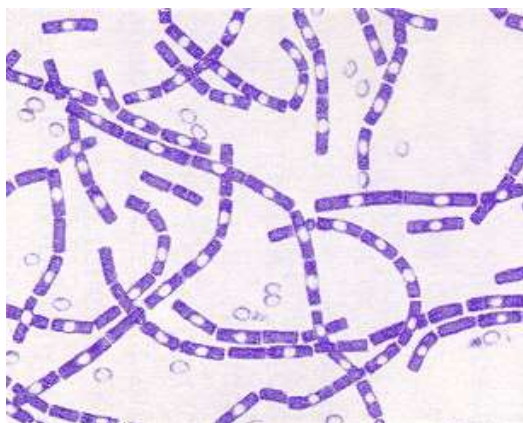
#### 2.5.1.2 แบ่งตามรูปร่าง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1) แบคทีเรียรูปร่างกลม (coccus) แบคทีเรียชนิดนี้มีรูปร่างกลมและอาจเกาะกันเป็นกลุ่มหรือต่อกันเป็นสาย เช่น *Staphylococcus spp.* *Streptococcus spp.* ดังรูปที่ 2.22 เป็นต้น



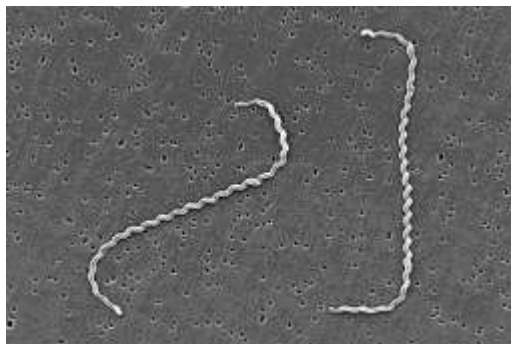
รูปที่ 2.22 *Staphylococcus spp.* และ *Streptococcus spp.* [43,44]

2) แบคทีเรียรูปร่างแท่ง (bacillus) แบคทีเรียชนิดนี้มีรูปร่างเป็นแท่งยาวและหนา เรียงตัวกันเป็นเส้นตรงยาว เช่น *Bacillus anthracis* ดังรูปที่ 2.23 เป็นต้น



รูปที่ 2.23 *Bacillus anthracis* [45]

4) แบคทีเรียรูปร่างเกลียว (spirochete) แบคทีเรียชนิดนี้มีรูปร่างเป็นเส้นยาวและบิดเป็นเกลียว เช่น *Leptospira interrogans* ดังรูปที่ 2.24 เป็นต้น



รูปที่ 2.24 *Leptospria interrogans* [46]

2.5.1.3 แบ่งตามการย้อมติดสี โดยใช้การย้อมติดสีแบบแกรม (gram staining) ซึ่งเป็นสีน้ำชนิดหนึ่งหยดลงไปบนแบคทีเรีย จนทำให้สีของผนังเซลล์ของแบคทีเรียมีสีแตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบลักษณะของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ [47]

ส่วนประกอบ	แบคทีเรียแกรมบวก	แบคทีเรียแกรมลบ
สีที่ย้อมติด	สีน้ำเงินม่วง	สีแดง
ผนังเซลล์	1 ชั้น	2 ชั้น
ความหนาของผนังเซลล์	20-80 นาโนเมตร	10 นาโนเมตร
peptidoglycan	60-100 %	5-20 %
polysaccharide	35-60 %	15-20 %
กรดทีโคอิก	บางชนิดมี	ไม่มี
ตัวอย่าง	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Escherichia coli</i>
ลักษณะของผนังเซลล์ [48]		

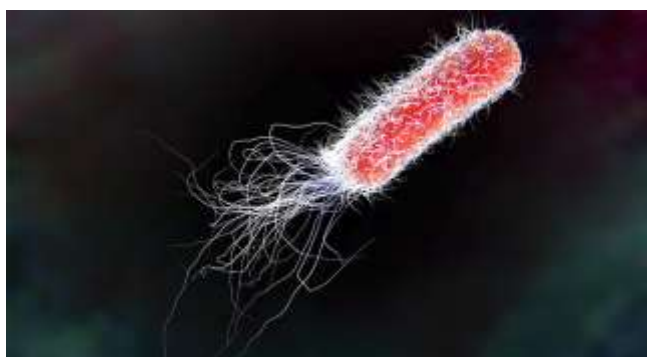
### 2.5.2 *Staphylococcus aureus*



รูปที่ 2.25 *Staphylococcus aureus* [49]

*Staphylococcus aureus* หมายถึง อนุกรมวิธาน อยู่ในโดเมน Bacteria อาณาจักร Eubacteria ไฟลัม Firmicutes ชั้น Bacilli อันดับ Bacillales วงศ์ Staphylococcaceae สกุล *Staphylococcus* สปีชีส์ *S. aureus* [50] แบคทีเรียชนิดนี้ย้อมติดสีแกรมบวก มีรูปร่างเป็นทรงกลม มักจะอยู่รวมกันคล้ายพวงองุ่น ไม่สร้างสปอร์ (non-spore forming bacteria) ไม่เคลื่อนไหว เมื่อไม่มีออกซิเจนจะสลายน้ำตาลกลูโคสเป็นกรดอินทรีย์ เจริญได้ดีช่วงอุณหภูมิ 30-37 องศาเซลเซียส พีเอช 7.0-7.5 มักสร้างสารพิษ (toxin) ชนิดเอนทีโรทอกซิน (enterotoxin) ซึ่งมีสมบัติพิเศษคือ ทนความร้อนได้ดี และทำให้เกิดอาการอาหารเป็นพิษในมนุษย์ [51]

### 2.5.3 *Escherichia coli*



รูปที่ 2.26 *Escherichia coli* [52]

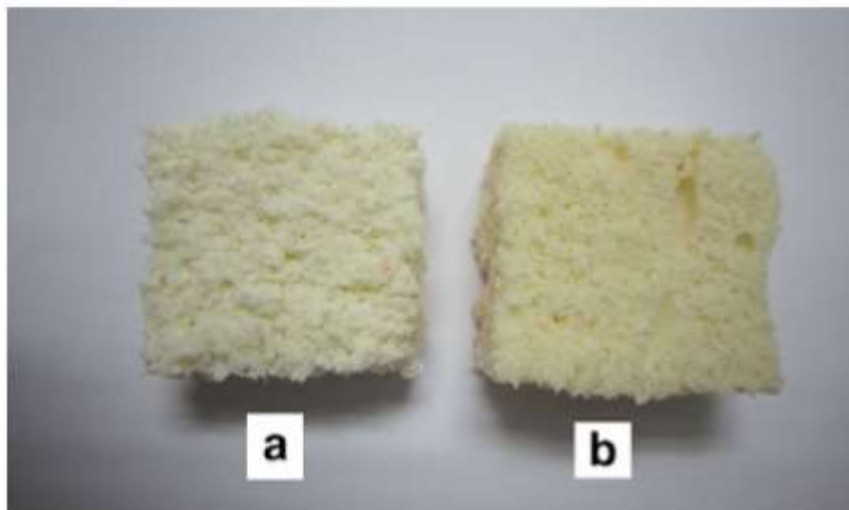
*Escherichia coli* ถูกค้นพบโดย Theodor Escherich อยู่ในโดเมน Bacteria อาณาจักร Eubacteria ไฟลัม Proteobacteria ชั้น Gamma Proteobacteria อันดับ Enterobacteriales วงศ์ Enterobacteriaceae สกุล *Escherichia* สปีชีส์ *Escherichia coli* [53] เป็นแบคทีเรียแกรมลบ

รูปร่างเป็นแท่ง ไม่สร้างสปอร์ เจริญได้ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน (facultative anaerobe) จะสร้างสารพิษประเภท verotoxin ทำให้เกิดอาการท้องร่วง ทำให้ถ่ายอุจจาระเหลวหรือเป็นน้ำ [54]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาการเตรียมโพนยางธรรมชาติจากน้ำยางธรรมชาติที่เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญของประเทศโดยกระบวนการต้นลอป ซึ่งเป็นกระบวนการต้นทุนต่ำ ใช้เวลานั้นสามารถควบคุมควบคุมความหนาแน่นของโพนได้ ที่สำคัญคือเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* โดยใช้สมุนไพรพื้นบ้านของประเทศไทยนั้นคือขมิ้นชัน เพื่อช่วยลดกลิ่นของโพนยางธรรมชาติและยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย แต่ก็ยังคงมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ไม่มากนัก จึงต้องเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีคุณสมบัติเด่นในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ด้วยกระบวนการไมโครเวฟ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สะดวก ง่าย รวดเร็ว และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และยังใช้ตัวรีดิวซ์และสารให้ความคงตัว คือน้ำขมิ้นชันจากขมิ้นชันแบบผงเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมี

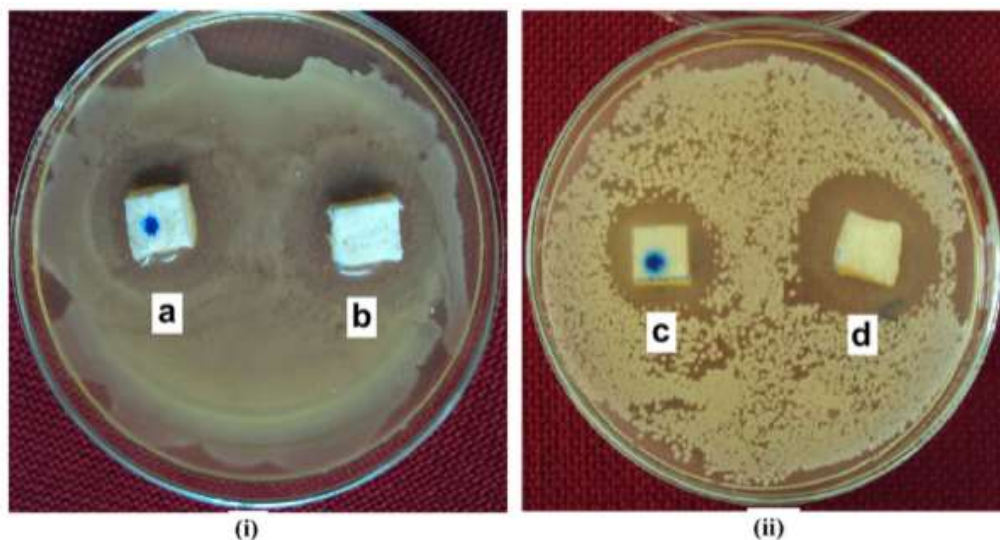
## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

W.G.I.U. Rathnayake และคณะ [55] ได้ทำการเตรียมโพนยางธรรมชาติผสมกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน เพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา โดยใช้น้ำยางธรรมชาติชั้นร้อยละ 60 ชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ปริมาณ 100.00 phr แล้วเติมสารแขวนลอยซิลเฟอร์แซมชั้นร้อยละ 50 ปริมาณ 2.50 phr, สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ  $6.99 \times 10^{-7}$  phr และสารแขวนลอยโพแทสเซียม โอลิเอตแซมชั้นร้อยละ 20 ปริมาณ 2.00 phr จากนั้นทำการปั่นกวนด้วยความเร็ว 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเติมสารแขวนลอยซิงค์ ไดเอทิลไดไฮโอคาร์บาร์เมท (ZDEC) และสารแขวนลอยซิงค์ ทูเมอร์แคปโทเบนโซโอสเลท (ZMBT) แซมชั้นร้อยละ 50 ปริมาณ 1.00 phr ลงไปอย่างช้า ๆ จากนั้นทำการปั่นกวนให้เข้ากันต่ออีก 8 ชั่วโมง จากนั้นใช้เครื่องปั่นผสม ดีของผสมเหล่านี้จนเกิดเป็นฟองละเอียด ประมาณ 5 นาที แล้วเติมสารก่อเจลปฐมภูมิ (primary gelling agent) นั่นคือสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แซมชั้นร้อยละ 40 และสารแขวนลอยไดฟีนิลกัวนิติน (DPG) แซมชั้นร้อยละ 40 ปริมาณ 3.00 และ 0.30 phr ตามลำดับ ปั่นกวนต่อไปอีก 90 วินาที แล้วเติมสารก่อเจลทุติยภูมิ (secondary gelling agent) นั่นคือสารแขวนลอยโซเดียมซิลิโกลูโอไรด์ แซมชั้นร้อยละ 25 ปริมาณ 1.00 phr อย่างรวดเร็ว ปั่นกวนต่อไปอีก 90 วินาที จากนั้นเทโพนที่ได้ลงในแม่แบบบอลูมิเนียมและรอให้โพนเกิดการเซตตัวในอุณหภูมิห้อง 2 นาที นำแม่แบบที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วจะทำการแกะโพนออกจากแม่แบบแล้วนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI-water) เพื่อกำจัดสารเคมีที่ยังตกค้างอยู่ จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะได้โพนยางธรรมชาติที่มีสีขาวออกเหลือง แต่ถ้าไม่มีการเติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน โพนยางธรรมชาติที่ได้จะมีสีขาวดั่งรูปที่ 2.27



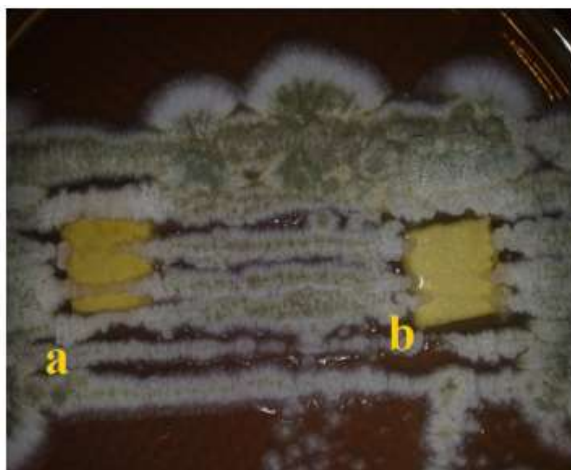
รูปที่ 2.27 ลักษณะของโพลียางธรรมชาติที่เตรียมได้ (a) ไม่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน และ (b) เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน [55]

จากนั้นนำเอาโพลียางธรรมชาติที่เตรียมได้ทั้งสองชนิด ไปทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย กับแบคทีเรียแกรมลบนั้นคือ *Escherichia coli* และแบคทีเรียแกรมบวก นั้นคือ methicillin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) ด้วยวิธีการ agar diffusion พบว่า โพลียางธรรมชาติที่มีการเติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน จะเกิดบริเวณยับยั้ง (inhibition zone) ที่ใหญ่กว่าโพลียางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน เนื่องจากซิลเวอร์นาโนจะทำการปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ออกมา ซึ่งมีผลในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย จึงทำให้เกิดบริเวณยับยั้งที่ใหญ่กว่า เนื่องจากในโพลียางธรรมชาติมีการเติม ZnO และ DPG ลงไป ซึ่งสารเหล่านี้ก็ยังมีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยเช่นกัน จึงทำให้โพลียางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนก็ปรากฏบริเวณยับยั้งขึ้นนั่นเอง นอกจากนั้นหากเปรียบเทียบบริเวณยับยั้งระหว่าง *Escherichia coli* และ MRSA จะเห็นได้ว่า บริเวณยับยั้งของ MRSA จะใหญ่กว่า อันเนื่องมาจาก MRSA จะมีผนังเซลล์ที่ใหญ่กว่า ทำให้เกิดบริเวณที่ไปสัมผัสกับสารที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้มาก จึงเกิดบริเวณยับยั้งใหญ่กว่า *Escherichia coli* ที่มีผนังเซลล์บางกว่า อีกหนึ่งเหตุผลคือ MRSA มีเยื่อหุ้มเซลล์เป็นประจุลบ จะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับ  $Ag^+$  ที่เป็นประจุบวก ทำให้เกิดการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่า จึงปรากฏเป็นบริเวณยับยั้งที่ใหญ่กว่านั่นเอง ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ธรรมชาติ a และ c คือ โพลีเมอร์ธรรมชาติที่ไม่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน, b และ d คือ โพลีเมอร์ธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน (i) *Escherichia coli* และ (ii) methicillin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) [55]

นอกจากนั้นยังได้นำไปทดสอบการยับยั้งเชื้อรา *Aspergillus niger* fungi. พบว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติที่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน เชื้อราไม่สามารถเติบโตได้บนโพลีเมอร์ ซึ่งต่างจากโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ไม่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เชื้อราสามารถเติบโตได้บนโพลีเมอร์ ดังรูปที่ 2.29



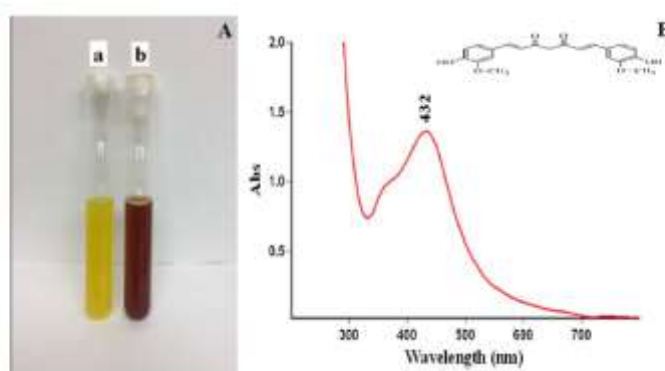
รูปที่ 2.29 สมบัติการยับยั้งเชื้อราของโพลีเมอร์ธรรมชาติ (a) ไม่เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน และ (b) เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน [55]

จากงานวิจัยนี้จึงบอกได้ว่า สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถกระจายตัวในเฟสของโพลีเมอร์ธรรมชาติได้ และยังสามารถช่วยเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราให้กับโพลีเมอร์ธรรมชาติได้อีกด้วย

His-Wen Tien และคณะ [56] ได้ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มใสที่นำไฟฟ้าได้ จากกราฟีนออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนกระจายตัวอยู่ เพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าและป้องกันการกลับมารวมตัวกันของแผ่นกราฟีนออกไซด์ โดยใช้กราฟีนออกไซด์ 50 มิลลิกรัม, ซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) 0.9 มิลลิโมลาร์ และน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร ผสมกันในขวดรูปชมพู่ที่คอกายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นของผสมเหล่านี้จะถูกนำไปอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์เข้มข้น 13 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตรเพื่อเป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนให้กลายเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน แล้วนำไปปั่นกวนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการแยกตะกอนด้วยการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) 10,000 รอบต่อนาที 10 ครั้ง ก็จะได้แผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนไปกระจายตัวอยู่

จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า ต้องใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนให้กลายเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน ซึ่งโซเดียมโบโรไฮไดรด์นั้นถือได้ว่าเป็นสารพิษ เมื่อสัมผัสกับผิวหนังจะทำให้เกิดเป็นแผลไหม้ได้ จึงมีความอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

Fouad K. Alsammarraale และคณะ [57] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยใช้สารสกัดจากสารธรรมชาติที่หาได้ทั่วไป เพื่อลดการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายนั่นคือ น้ำมัน เพื่อใช้เป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออน โดยนำเอาน้ำมันสกัดมาผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต จะได้เป็นสารละลายสีเหลืองดังรูปที่ 2.30 (a) จากนั้นทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้มดังรูปที่ 2.30 (b) ซึ่งสามารถใช้เทคนิค UV-Vis spectroscopy ยืนยันการเกิดขึ้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ ซึ่งจะเกิดพิกเอกลักษณะที่ประมาณ 420 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.30 (B)



รูปที่ 2.30 (A) สารละลายผสมระหว่างน้ำมันและซิลเวอร์ไนเตรต a คือก่อนทำการปั่นกวน b คือหลังการปั่นกวน 24 ชั่วโมง และ (B) UV-Vis spectra พิกเอกลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโน [57]

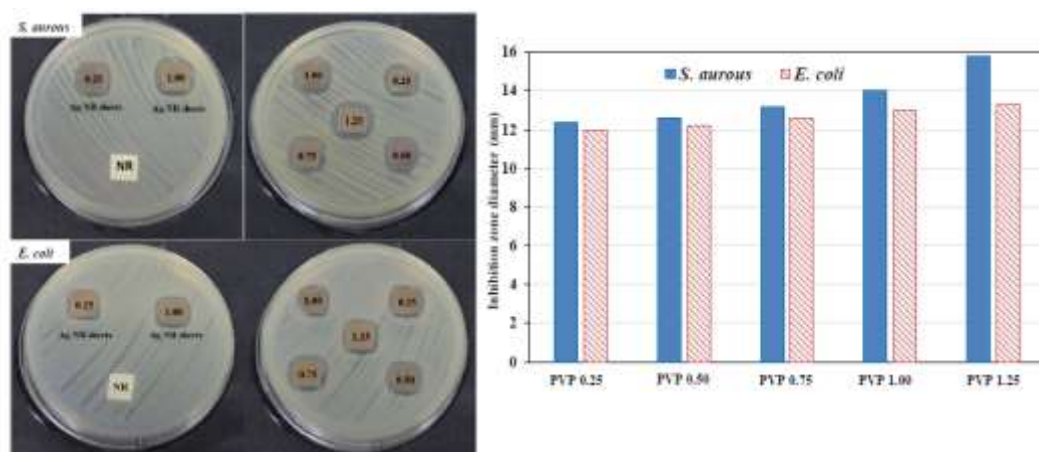
จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า น้ำมันสามารถเป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ แต่ยังใช้ในการเวลาดำเนินการค่อนข้างนาน

Warot Prasanseang และคณะ [58] จึงได้ทำการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยลงการใช้ตัวรีดิวซ์ที่เป็นพิษลง โดยจะใช้สารจำพวกพอลิเมอร์นั่นคือ พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เป็นตัวรีดิวซ์ และตัวสร้างเสถียรภาพ นอกจากนั้นยังใช้กระบวนการไมโครเวฟที่เป็นกระบวนการที่ง่าย รวดเร็ว และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยทำการละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.30 กรัม ในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดนลงไป 15 มิลลิลิตร ปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเข้าตู้ไมโครเวฟกำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 90 วินาที โดยทุก ๆ 15 วินาที จะนำเอาสารออกมาคนเพื่อลดการปะทุเนื่องจากความร้อน สารละลายผสมที่ได้จะเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลืองเข้มขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณอัตราส่วนของ PVP กับซิลเวอร์ไนเตรต ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการใช้ปริมาณของ PVP ต่างกัน [58]

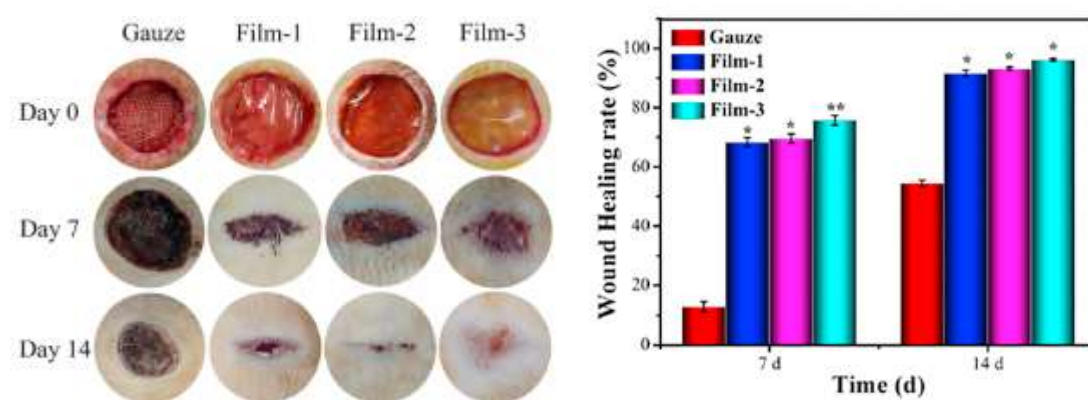
นอกจากนั้นสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้ ยังถูกนำไปเติมในแผ่นยางธรรมชาติแล้วนำไปทดสอบสมบัตการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* พบว่าบริเวณยับยั้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอัตราส่วนของ PVP กับซิลเวอร์ไนเตรต ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 บริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์นาโน [58]

จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า สามารถลดการใช้ตัวรีดิวซ์ที่เป็นสารอันตรายได้ และยังลดเวลาในการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยการใช้กระบวนการไมโครเวฟซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วเพียง 90 วินาที ง่าย สะดวก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน

Xiaocui Liu และคณะ [59] ได้ทำการเตรียมแผ่นรักษาผิวหนังจากแผ่นฟิล์มผสมระหว่างไคโตซาน (chitosan) และว่านหางจระเข้ (aloe) ที่สามารถปลดปล่อยเคอร์คูมิน (curcumin) ซึ่งช่วยในการสมานบาดแผลได้ โดยทำการทดลองกับบาดแผลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรของหนูทดลองพันธุ์วิสตาตาร์ (Wistar rat) เพศผู้ขนาด 300 กรัม พบว่าแผ่นรักษาผิวหนังหมายเลข 3 ที่มีการเติมเคอร์คูมิน ลงไปนั้น สามารถสมานแผลได้ถึงร้อยละ 90 เมื่อผ่านไป 14 วัน ซึ่งดีกว่าแผ่นรักษาผิวหนังหมายเลข 1 และ 2 ที่ไม่มีการเติมเคอร์คูมินลงไป ดังรูปที่ 2.33 นอกจากนี้แผ่นฟิล์มหมายเลข 3 ยังพบว่าสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.33 ลักษณะบาดแผลของหนูวิสตาตาร์ที่ถูกปิดด้วยแผ่นรักษาผิวหนัง [59]

G. Devanand Venkatasubbu และคณะ [55] ได้ทำการเตรียมผ้าปิดแผลจากเคอร์คูมิน นาโนคอมโพสิต (curcumin nanocomposite) โดยได้เตรียมสารละลายน้ำขมิ้นจากการนำเอาผงขมิ้นไปละลายในตัวทำละลายไดเมทิล ซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปหยดในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ในอัตราส่วน 5:1 แล้วทำการปั่นกวนให้สารทั้งสองเข้ากันเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้สารแขวนลอยสีน้ำตาลดังรูปที่ 2.34 จากนั้นนำไปทำการปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนบางส่วนออกไป แล้วนำไปเคลือบบนผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการ spin coating จะได้ผ้าสีเหลือง ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.34 ลักษณะของสารแขวนลอยเคอร์คูมิน นาโนคอมโพสิต [60]



(a)



(b)

รูปที่ 2.35 ลักษณะของผ้าฝ้าย (a) ผ้าฝ้ายก่อนถูกเคลือบ และ (b) ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยเคอร์คูมิน นาโนคอมโพสิต [60]

เมื่อนำเอาผ้าปิดแผลที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่าง ๆ พบว่า ผ้าปิดแผลที่เคลือบด้วยเคอร์คูมิน นาโนคอมโพสิต สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้หลายชนิด และยังมีขนาดของบริเวณยับยั้งมากขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นที่มากขึ้นของเคอร์คูมิน นาโนคอมโพสิต ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงขนาดของบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้าปิดแผลที่เคลือบด้วยเคอร์คูมิน นาโนคอมโพสิต [60]

Organism	Positive control	250 µg/ml	500 µg/ml	750 µg/ml	1000 µg/ml
<i>E. coli</i>	19	-	7	10	19
<i>B. subtilis</i>	18	-	8	11	18
<i>S. aureus</i>	41	-	6	12	14
<i>E. faecalis</i>	19	-	6	14	19
<i>S. epidermis</i>	15	-	7	13	15
<i>K. pneumoniae</i>	20	-	7	10	20
<i>E. aerogenes</i>	28	-	8	12	28
<i>P. vulgaris</i>	22	-	7	13	22
<i>P. mendocina</i>	16	-	8	10	16
Coliform	19	-	8	11	19

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมโพลิเมอร์อย่างธรรมชาติที่มีสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ด้วยการเติมน้ำมัน และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ คือ การเตรียมน้ำมันชั้นสัด การเตรียมอนุภาคซิลเวอร์นาโน และการเตรียมโพลิเมอร์อย่างธรรมชาติที่มีการเติมน้ำมัน และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

#### 3.1 สารเคมี

- 1) น้ำมันขี้ผึ้ง 60 โดยน้ำหนัก ชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia; HA) ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 2) สารแขวนลอยโพแทสเซียมโอเลต (K-Oleate) เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 3) สารแขวนลอยซัลเฟอร์ (Sulphur; S) เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 4) สารแขวนลอยซิงค์ ไดเอทิลไดไทโอคาร์บารเมท (Zinc diethyldithiocarbamate; ZDEC) เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 5) สารแขวนลอยซิงค์ ทุเมอร์แคปโทเบนโซอิลเลท (Zinc 2-mecaptobenzthiozolate; ZMBT) เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 6) สารแขวนลอยวิงส์เตย์ – แอล (Wingstay – L) เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 7) สารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 8) สารแขวนลอยไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenylguanidine; DPG) เข้มข้นร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 9) สารแขวนลอยโซเดียม ซิลิโกฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride; SSF) เข้มข้นร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก ซื้อจากกองการยางแห่งประเทศไทย
- 10) เหม้าขี้ผึ้งชั้นสัด ยี่ห้อ My Choice
- 11) ผงขี้ผึ้งชั้น บริษัท อ้วยอันไอสด จำกัด
- 12) ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate; AgNO<sub>3</sub>) ความบริสุทธิ์ 99.99% บริษัท Carlo Erba
- 13) น้ำกลั่น

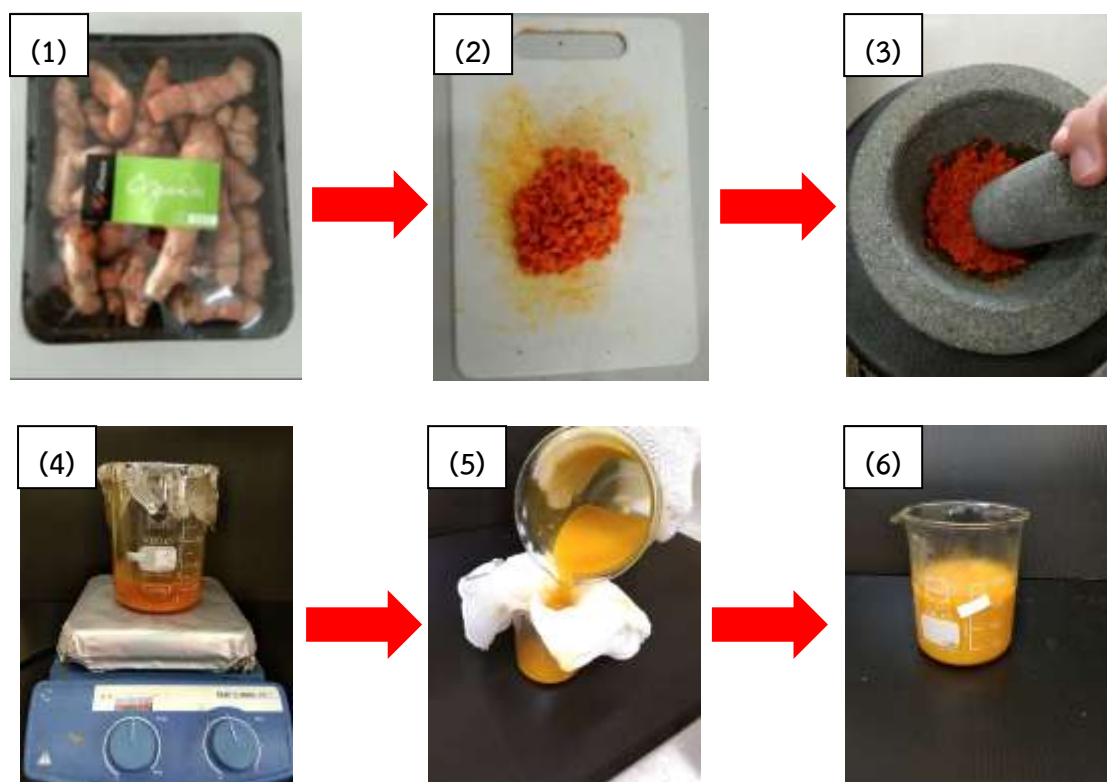
### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องแก้ว (Glassware)
- 2) ช้อนตักสาร (Spatular)
- 3) แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- 4) เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น FR-200 บริษัท A&D company
- 5) เครื่องปั่นกวนแบบให้ความร้อนและแท่งแม่เหล็ก (Hotplate and Magnetic bar)
- 6) ผ้าขาวบางอย่างหนา
- 7) มีดและเขียงพลาสติก
- 8) ครกหิน
- 9) ตู้อบ (Oven) Serial No.8 502.0552 บริษัท MEMMERT
- 10) เครื่องตีฟอง ยี่ห้อ Otto รุ่น HM-273 กำลังไฟ 250 วัตต์
- 11) ไมโครเวฟ ยี่ห้อ Samsung รุ่น MG – 23F301EAS/ST
- 12) ไมโครปิเปต (Micropipette)
- 13) เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer; UV-Vis) รุ่น Blue star series บริษัท Labtech
- 14) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray; SEM-EDX) บริษัท Japan รุ่น JEOL-JSM5800LV และบริษัท Oxford ISIS 300
- 15) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) บริษัท JEOL รุ่น JEM-2100 ประเทศญี่ปุ่น
- 16) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) บริษัท Shimadzu, Japan รุ่น XRD-6100
- 17) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier - Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) บริษัท Thermo Fisher Scientific Inc., USA รุ่น Nicolet iS50
- 18) เครื่องทดสอบแรงดัน (Universal testing machine) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR 5K

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมน้ำไขมันชั้น จากเหง้าขมิ้นชันสด

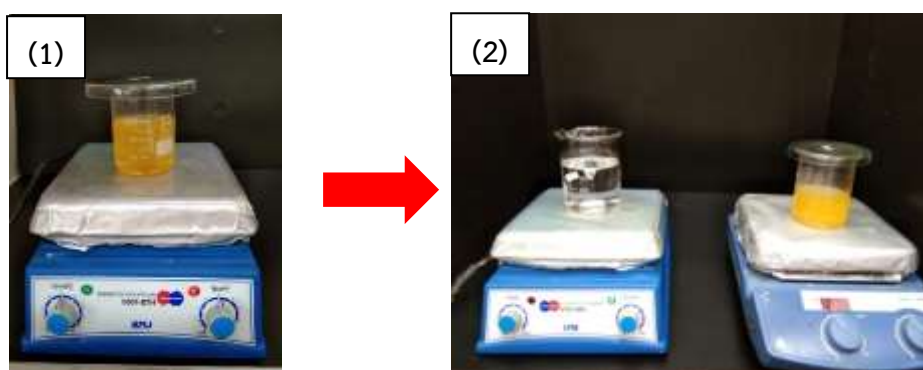
- 1) ล้างเหง้าขมิ้นชันสดประมาณ 200 กรัมให้สะอาดด้วยน้ำสะอาด
- 2) ใช้มีดปอกเปลือกเหง้าขมิ้นชัน และหั่นให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ
- 3) นำไปตำให้ละเอียดในครกหิน
- 4) นำเหง้าขมิ้นที่ตำละเอียดแล้วถ่ายลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นจนให้ความร้อนประมาณ 150 องศาเซลเซียส พร้อมกับปิดปากบีกเกอร์ด้วยฟอยล์อลูมิเนียมเป็นเวลา 30 นาที
- 5) ตั้งพักทิ้งไว้ให้อุ่น แล้วเทกรองผ่านผ้าขาวบางอย่างหนา
- 6) ได้น้ำขมิ้นชันสด จากเหง้าขมิ้นชัน โดยคำนวณหาความเข้มข้นได้ 32.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยขั้นตอนทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.1



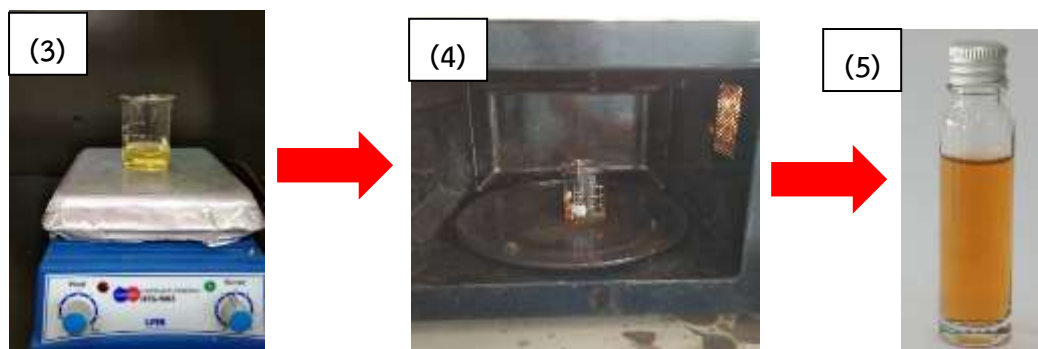
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายของ (1) ขมิ้นชันสด (2) ขมิ้นชันที่หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ (3) การตำขมิ้นชันในครกหิน (4) การปั่นขมิ้นชันที่บดละเอียดด้วยน้ำร้อน (5) การกรองน้ำขมิ้นชันออกจากเศษผงขมิ้นชัน และ (6) น้ำขมิ้นชันสด

### 3.3.2 การศึกษาผลของปริมาณน้ำมันและเวลาในการไมโครเวฟ ของการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน จากผงขมิ้นชัน

- 1) ชั่งผงขมิ้นชัน 0.05 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำ 100 มิลลิลิตร
- 2) แล้วนำไปต้มเป็นเวลา 15 นาที พร้อมกับการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก
- 3) ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเทกรองผ่านผ้าขาวบางอย่างหนา เพื่อให้ได้น้ำมันชัน ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
- 4) เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ด้วยการชั่งซิลเวอร์ไนเตรต 0.15 กรัม แล้ว ละลายด้วยน้ำ 30 มิลลิลิตร แบ่งสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่เตรียมไว้ มา 15 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่น และน้ำมันลงไป ปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1
- 5) ปั่นกวนให้เข้ากันด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
- 6) นำไปไมโครเวฟด้วยกำลังไฟ 450 วัตต์ โดยใช้เวลาแตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.2 โดยทุก ๆ 15 วินาที ให้นำบีกเกอร์ออกมาคนเพื่อลดความเดือดของสารละลาย จะได้สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่มีความเข้มข้น 7.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยขั้นตอนได้แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายของ (1) น้ำมันชันความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (2) สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต และน้ำมันชัน (มีต่อ)



รูปที่ 3.2 (ต่อ) (3) สารผสมระหว่างสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต และน้ำมันชั้น ก่อนนำไปเข้าเครื่องไมโครเวฟ (4) กระบวนการให้คลื่นไมโครเวฟด้วยเครื่องไมโครเวฟขนาดกำลังไฟ 450 วัตต์ และ (5) สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขของเวลาในการให้คลื่นไมโครเวฟในการเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน

ตัวอย่าง	ปริมาณ $\text{AgNO}_3$ (mL)	ปริมาณน้ำมัน (mL)	ปริมาณน้ำกลั่น (mL)	เวลา (sec)
T-0s	15	5	5	0
T-30s	15	5	5	30
T-60s	15	5	5	60
T-90s	15	5	5	90
T-120s	15	5	5	120
T-150s	15	5	5	150
T-180s	15	5	5	180
T-210s	15	5	5	210

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขของสัดส่วนของน้ำมันในการเตรียมสารแขวนลอยซิลเวอร์นาโน

ตัวอย่าง	ปริมาณ $\text{AgNO}_3$ (mL)	ปริมาณน้ำมัน (mL)	ปริมาณน้ำกลั่น (mL)
T-0	15	0	10
T-1	15	1	9
T-3	15	3	7
T-5	15	5	5
T-6	15	6	4
T-7	15	7	3

### 3.3.3 การเตรียมโพลียเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต (PET) รูปแบบต่าง ๆ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมโพลียเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตทั้งหมด 3 รูปแบบ โดยใช้กระบวนการของด้นลอป ดังนี้

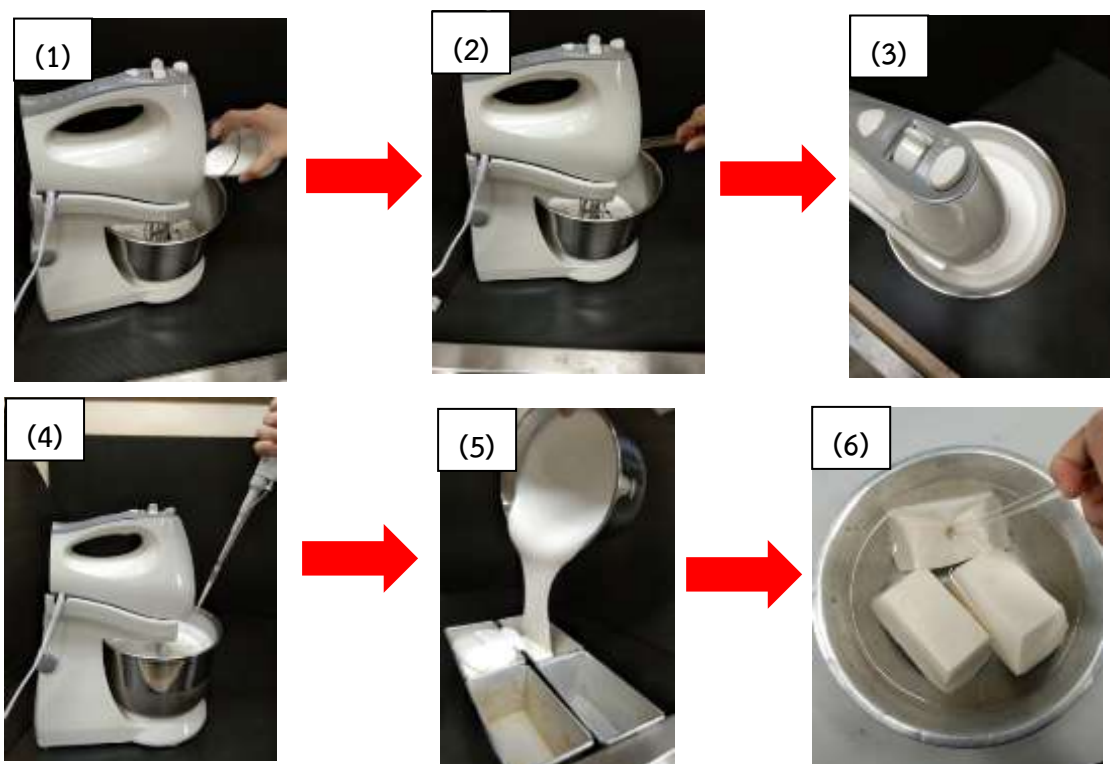
3.3.3.1 โพลียเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต (PET) 3 ตัวอย่าง โดยใช้เวลาในการตีฟองที่แตกต่างกันคือ 3, 5 และ 7 นาที มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

- 1) ชั่งน้ำยางธรรมชาติ ชนิดแอมโมเนียสูงประมาณ 250 กรัม (100 phr) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร แล้วเทลงในโถตีของเครื่องตีผสมอาหาร
- 2) เติมน้ำมันสนเกล็ดขาว 27.00 มิลลิลิตร (1.8 phr)
- 3) ตีฟองด้วยความเร็วสูงสุดเป็นเวลาที่แตกต่างกันคือ 3, 5 และ 7 นาที
- 4) ลดความเร็วให้เป็นความเร็วที่ต่ำที่สุด แล้วเติมน้ำมันสนเกล็ดขาว 4.55 มิลลิลิตร (2phr), สารแขวนลอยซิงค์ ไดเอทิลไดไฮโอคาร์บารเมท 2.59 มิลลิลิตร (1phr), สารแขวนลอยซิงค์ ทุเมอร์แคปโทเบนโซโซล 2.80 มิลลิลิตร (1phr), สารแขวนลอยวิงส์เตย์ - แอล 2.97 มิลลิลิตร (1 phr)
- 5) ตีฟองต่อไปด้วยความเร็วต่ำที่สุด เป็นเวลา 2 นาที
- 6) เติมน้ำมันสนเกล็ดขาวออกไซด์ และสารแขวนลอยไดฟีนิลกัวนิดิน ปริมาณ 9.12 (5 phr) และ 6.15 มิลลิลิตร (1.4 phr) ตามลำดับ ลงในฟองยาง
- 7) ตีฟองต่อไปด้วยความเร็วต่ำที่สุด เป็นเวลา 2 นาที
- 8) เติมน้ำมันสนเกล็ดขาวซิลิโกลูออไรด์ ปริมาณ 13.40 มิลลิลิตร (1.2 phr) ตีฟองกับสารเคมีให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที
- 9) เทฟองยางที่ได้ลงในแบบพิมพ์ รอให้ฟองยางเซตตัวเป็นเวลา 2 นาที
- 10) นำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 11) รอให้แบบพิมพ์เย็นตัว แล้วแกะโพลียเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตออกมาผึ่งลมเป็นเวลา 1 คืน
- 12) ชักล้างโพลียเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารเคมีที่ยังหลงเหลืออยู่ แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน ก็จะได้โพลียเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต โดยขั้นตอนทั้งหมดได้แสดงในรูปแบบที่ 3.3 และปริมาณสัดส่วนของสารเคมีได้แสดงในตารางที่ 3.3

\*หมายเหตุ phr คือ ร้อยละต่อน้ำหนักยางแห้ง (part per hundred of rubber dry)

ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติ

สารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (phr)		
	NRF 3 min	NRF 5 min	NRF 7 min
60% HA NR Latex	100	100	100
10% K-Oleate	1.8	1.8	1.8
50% S	1.0	1.0	1.0
50% ZDEC	1.0	1.0	1.0
50% ZMBT	1.0	1.0	1.0
50% Wingstay-L	1.0	1.0	1.0
50% ZnO	5.0	5.0	5.0
33% DPG	1.4	1.4	1.4
12.5% SSF	1.2	1.2	1.2



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายของ (1) การเทน้ำยางธรรมชาติลงในโถตีของเครื่องตีผสมอาหาร (2) การเติมสารแขวนลอยโพแทสเซียมโอเลตลงไปในน้ำยางธรรมชาติ (3) การตีฟองน้ำยางธรรมชาติด้วยความเร็วสูงสุด (4) การเติมสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ และสารแขวนลอยไดฟีนิลกัวนิดีน (5) การเทฟองยางลงในแบบพิมพ์ (6) การซักร้างโฟมยางธรรมชาติที่เตรียมได้ (มีต่อ)



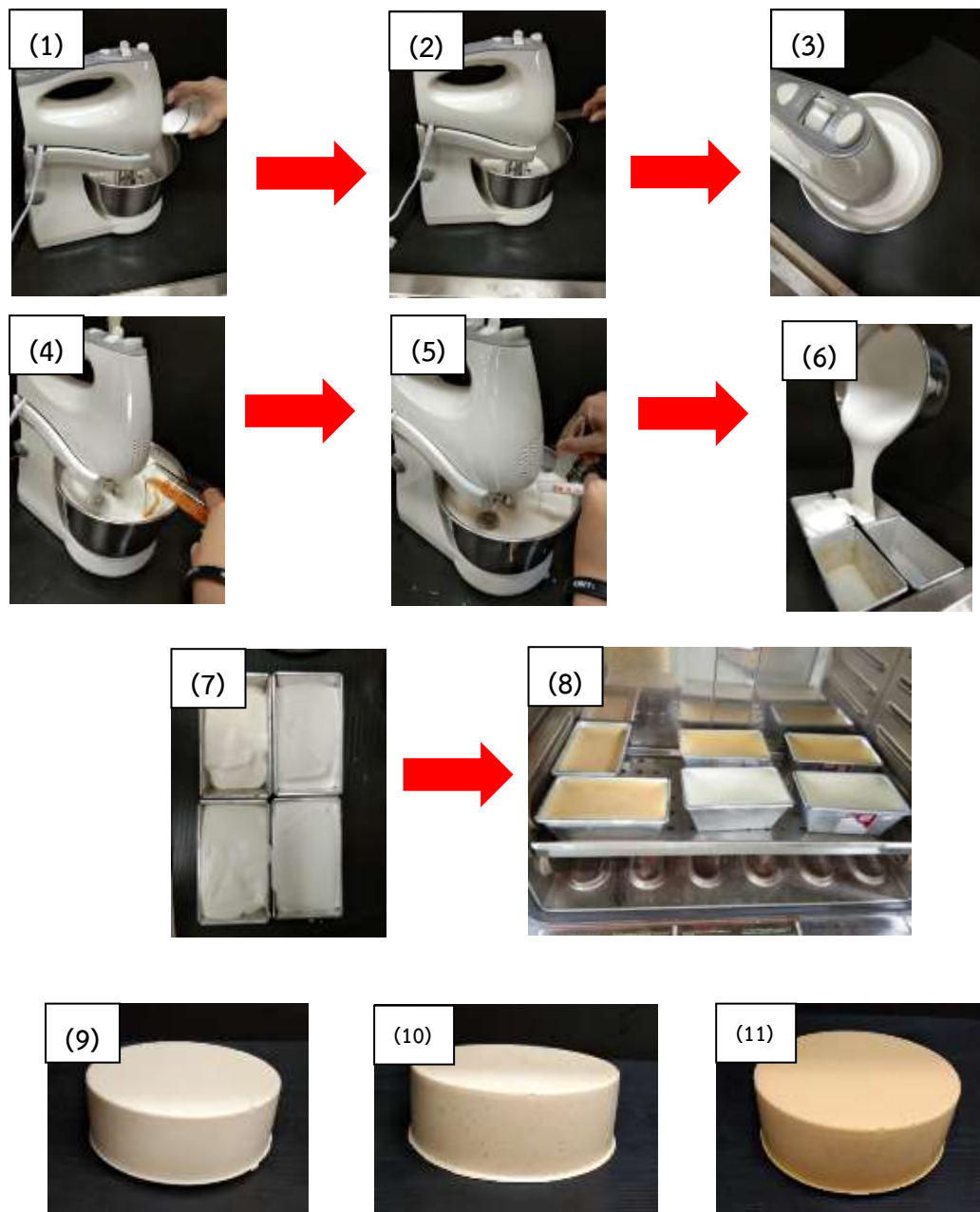
รูปที่ 3.3 (ต่อ) (7) โฟมยางธรรมชาติที่เตรียมได้

เนื่องจากโฟมยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากการตีฟองเป็นเวลา 5 นาที พบว่าจากผลของ SEM มีขนาดรูพรุนที่เล็กที่สุด และให้ค่าต้านทานแรงดึงและแรงกดอัดสูงที่สุด จึงได้เลือกเงื่อนไขนี้ไปเตรียม โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันสด และโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนต่อไป

3.3.3.2 โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันสด (NRF+T) 3 ตัวอย่าง ก็ทำได้เช่นเดียวกับ กระบวนการเตรียมโฟมยางธรรมชาติในหัวข้อที่ 3.3.3.1 แต่ใช้ปริมาณน้ำมันที่แตกต่างกัน คือ 3, 9 และ 15 มิลลิลิตร โดยจะมีการใช้เวลาในการตีฟอง 5 นาที และทำการเติมน้ำมัน ลงไปในขั้นตอนที่ 4) ภายหลังจากการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปแล้ว โดยจะมีการใช้สารเคมีใน สัดส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้น

สารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (phr)			
	NRF	NRF + T0.064 phr	NRF + T0.190 phr	NRF + T0.320 phr
60% HA NR Latex	100.000	100.000	100.000	100.000
10% K-Oleate	1.800	1.800	1.800	1.800
50% S	1.000	1.000	1.000	1.000
50% ZDEC	1.000	1.000	1.000	1.000
50% ZMBT	1.000	1.000	1.000	1.000
50% Wingstay-L	1.000	1.000	1.000	1.000
32.0 mg/mL Turmeric suspension	-	0.064	0.190	0.320
50% ZnO	5.000	5.000	5.000	5.000
33% DPG	1.400	1.400	1.400	1.400
12.5% SSF	1.200	1.200	1.200	1.200



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายของ (1) การพ่นน้ำยาธรรมชาติลงในโถตีของเครื่องตีผสมอาหาร (2) การเติมสารแขวนลอยโพแทสเซียมโอเลตลงในน้ำยาธรรมชาติ (3) การตีฟองน้ำยาธรรมชาติด้วยความเร็วสูงสุด (4) การเติมน้ำมันชั้นลงในฟองยาง (5) การเติมรสสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ และสารแขวนลอยไดฟีนิลกัวนิติน (6) การเทฟองยางลงในแบบพิมพ์ (7) การพักฟองยางในแบบพิมพ์ (8) การอบฟองยางในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ (9) – (11) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำไขมันปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr ตามลำดับ

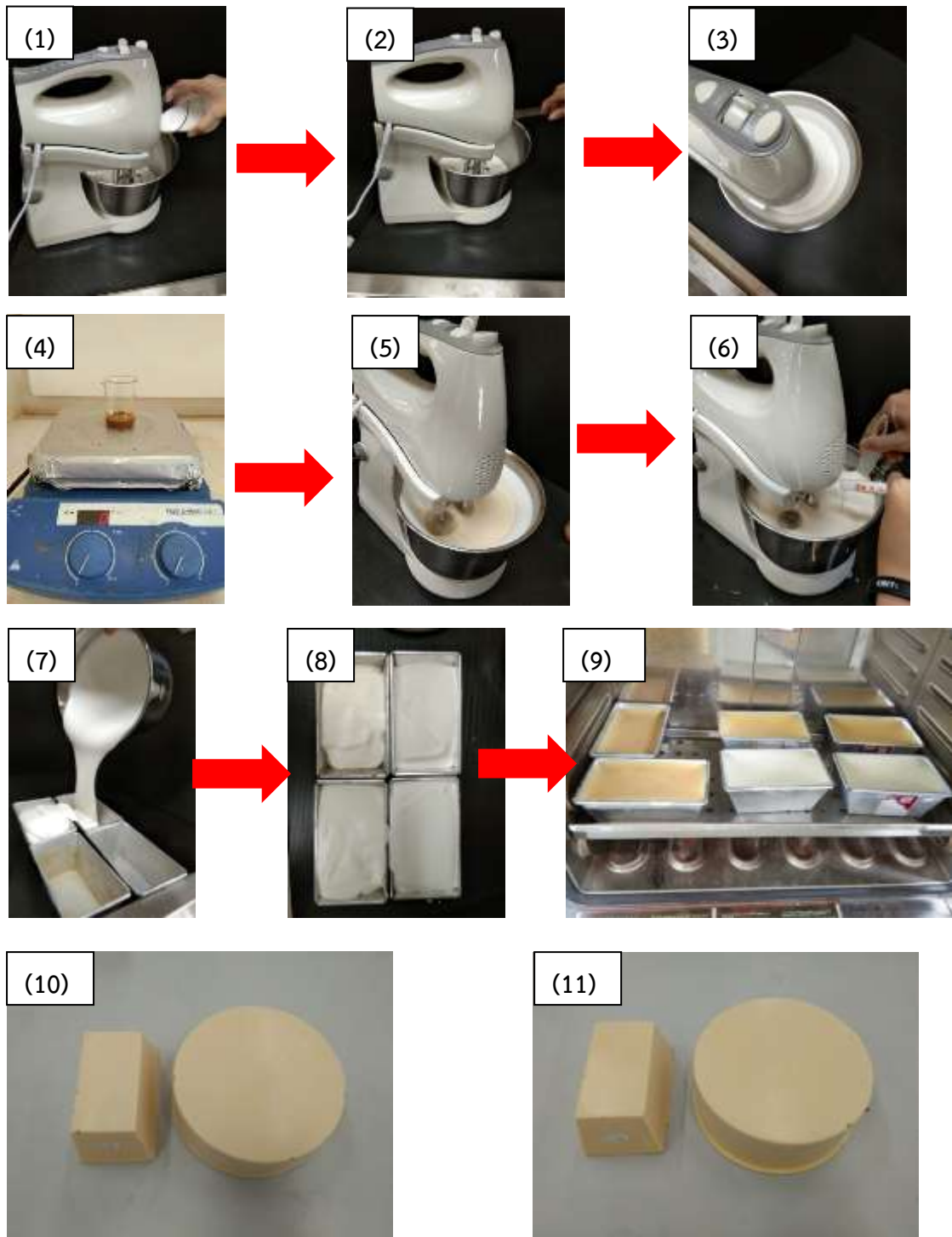
เนื่องจากการเตรียมโพลียาทรอสมชาติผสมน้ำขมชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ไม่สามารถใช้ปริมาณของของเหลวตัวเติมมากเกินไปกว่า 15 มิลลิลิตรได้ เพราะจะทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปโพลียาทรอสมชาติได้ จึงจำเป็นต้องเลือกเงื่อนไขที่โพลียาทรอสมชาติผสมน้ำขมชั้นสดที่ 9 มิลลิลิตร เนื่องจากยังเหลือปริมาณอีก 6 มิลลิลิตร ให้กับการเติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ ไปทำการเตรียมโพลียาทรอสมน้ำขมชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนต่อไป

### 3.3.3.3 โพลียาทรอสมชาติผสมน้ำขมชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน (NRF+T+Ag)

2 ตัวอย่าง สามารถเตรียมได้เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.3.3.1 แต่จะมีการศึกษาผลของการเติมอนุภาคซิลเวอร์ในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 3 และ 6 มิลลิลิตร จะมีการใช้เวลาในการตีฟอง 5 นาที และใช้ปริมาณน้ำขมชั้นในปริมาณ 9 มิลลิลิตร โดยจะมีการใช้สารเคมีในสัดส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.5

**ตารางที่ 3.5** แสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโพลียาทรอสมชาติผสมน้ำขมชั้นกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

สารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (phr)		
	NRF + T0.190 phr	NRF + T0.190 phr +Ag 0.014 phr	NRF + T0.190 phr +Ag 0.028 phr
60% HA NR Latex	100.000	100.000	100.000
10% K-Oleate	1.800	1.800	1.800
50% S	1.000	1.000	1.000
50% ZDEC	1.000	1.000	1.000
50% ZMBT	1.000	1.000	1.000
50% Wingstay-L	1.000	1.000	1.000
32.0 mg/mL Turmeric	0.190	0.190	0.190
7.0 mg/mL AgNPs	-	0.014	0.028
50% ZnO	5.000	5.000	5.000
33% DPG	1.400	1.400	1.400
12.5% SSF	1.200	1.200	1.200



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายของ (1) การเทน้ำยางธรรมชาติลงในโถตีของเครื่องตีผสมอาหาร (2) การเติมสารแขวนลอยโพแทสเซียมโอเลตลงไปใต้น้ำยางธรรมชาติ (3) การตีฟองน้ำยางธรรมชาติด้วยความเร็วสูงสุด (4) สารผสมระหว่างน้ำมันชั้นกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน (5) การตีฟองด้วยความเร็วสูงสุด (6) การเติมสารแขวนลอยซิงค์ออกไซด์ และสารแขวนลอยไคฟิโนลิกัวนินีนิน (7) การเทฟองยางลงในแบบพิมพ์ (8) การพักฟองยางในแบบพิมพ์ (9) การอบฟองยางในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ (10) – (11) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.014 และ 0.028 phr ตามลำดับ

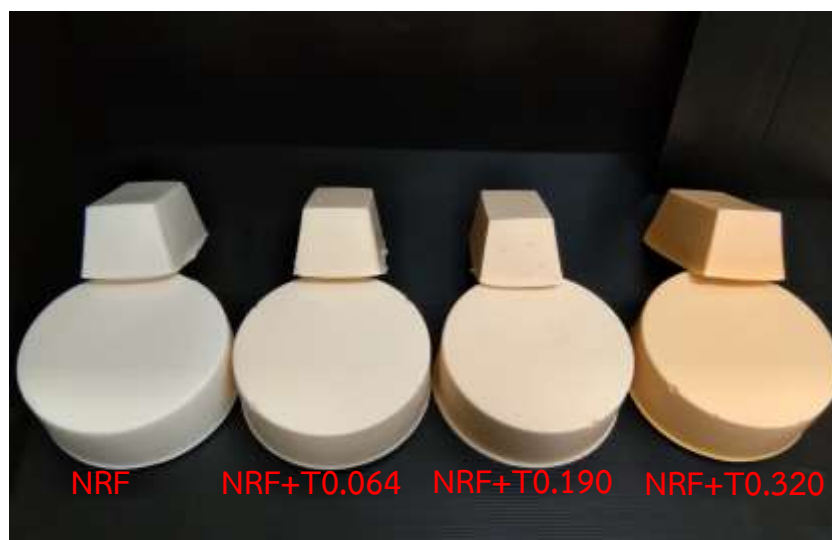
ตารางที่ 3.6 แสดงสัดส่วนของการเตรียมโฟมยางธรรมชาติ

ตัวอย่าง	เวลาในการตีฟอง (นาที)	น้ำมันชั้นสด (mL)	สารแขวนลอย AgNPs (mL)
NRF 3 min	3	-	-
NRF 5 min	5	-	-
NRF 7 min	7	-	-
NRF + T0.064 phr	5	3	-
NRF + T0.190 phr	5	9	-
NRF + T0.320 phr	5	15	-
NRF + T0.192 phr + Ag0.014 phr	5	9	3
NRF + T0.192 phr + Ag0.028 phr	5	9	6

โดยที่ NRF คือ โฟมยางธรรมชาติ (Natural Rubber Foam)

T คือ น้ำมันชั้นสด (Turmeric)

ยกตัวอย่างของชื่อย่อของโฟมยางธรรมชาติ NRF + T0.320 phr คือ โฟมยางธรรมชาติที่มีส่วนประกอบของน้ำมันชั้นสดอยู่ร้อยละ 0.320 โดยน้ำหนักของยางแห้ง (น้ำหนักของเนื้อน้ำมันชั้นสด 0.48 กรัม ต่อน้ำหนักยางแห้ง 150 กรัม)



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบลักษณะของโฟมยางธรรมชาติ NRF, NRF+T0.064, NRF+T0.190 และ NRF+T0.320 ตามลำดับ

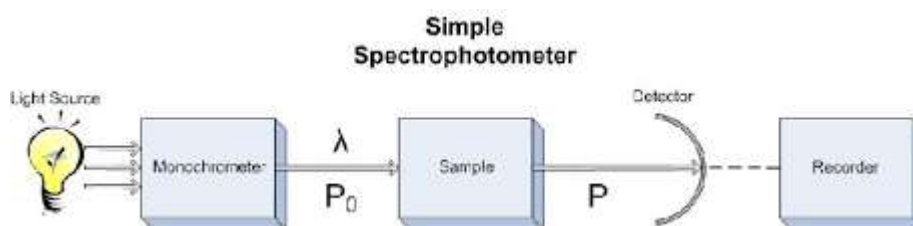
จากรูปที่ 3.6 พบว่า น้ำขมิ้นชันสดสามารถเปลี่ยนสีของโพลียาคริลิกจากสีขาว เป็นสีเหลืองส้มใน NRF+T0.064 และเห็นสีส้มเหลืองเข้มยิ่งขึ้นใน NRF+T0.320 ซึ่งมาจากปริมาณที่มากขึ้นของน้ำขมิ้นชันสด ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นสีเหลืองส้ม

### 3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ

เมื่อได้ทำการเตรียมโพลียาคริลิกที่มีการเติมน้ำขมิ้นชันสด และสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ออกมาแล้ว จะนำไปทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางแสงของสารตัวอย่าง เช่น การดูดกลืน การทะลุผ่าน การสะท้อนของแสง จากการใช้ช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet light; UV) ที่มีความยาวคลื่นแสงต่ำกว่า 400 นาโนเมตร และช่วงแสงที่มองเห็นได้ (visible light) ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 – 800 นาโนเมตร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ (quality) และเชิงปริมาณ (quantity) โดยอาศัยความสามารถในการดูดกลืนแสงของโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนพลังงานจากแสง แล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า หลักการของเทคนิคนี้คือ แห่่งกำเนิดแสงจะให้กำเนิดแสงอย่างต่อเนื่องแล้วจะมีตัวเลือกแสง (monochromator) คอยคัดกรองให้เหลือเพียงแสงที่มีความยาวคลื่นตามต้องการผ่านไปยังสารตัวอย่าง ด้วยความเข้มแสงเริ่มต้น ( $P_0$ ) สารตัวอย่างจะเกิดการดูดกลืนทางแสงขึ้น แล้วเกิดการปล่อยแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน ( $P$ ) ไปยังเครื่องตรวจวัด (detector) ดังรูปที่ 3.7 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ จะแสดงออกมาเป็นสเปกตรัม (spectrum) ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น (wavelength) ซึ่งการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงจะใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้



รูปที่ 3.7 หลักการเบื้องต้นของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [61]

### 3.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้นั้นมีขนาดเล็กมาก จึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในการตรวจสอบดังรูปที่ 3.8 เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านนี้สามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 0.1 นาโนเมตรได้ โดยการสร้างภาพจากกล้องนี้จะอาศัยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดแล้วถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ผ่านยังเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกลายเป็นลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่ต้องการจะศึกษา (specimen) ซึ่งตัวอย่างนี้ต้องแบนและบางมาก ด้วยการหยดอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงบนกริดทองแดง (copper's grid) ที่งัวจันแห้งแล้วจึงนำมาวิเคราะห์ อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างจะถูกปรับโฟกัสด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ซึ่งจะขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด แล้วถ่ายทอดไปยังจอร์บ (projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้ในรูปแบบภาพ 2 มิติ โดยเทคนิคนี้จะช่วยในการพิสูจน์เอกลักษณ์และวัดขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้ [62]



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [63]

### 3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ที่พื้นผิว ซึ่งจะทำให้เห็นภาพโครงสร้างเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ โดยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ผ่านยังเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับขนาดลำอิเล็กตรอนให้เล็กหรือใหญ่ได้ตามความต้องการ หากต้องการภาพที่คมชัดจะต้องปรับให้ลำอิเล็กตรอนนี้มีขนาดเล็ก จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป [62] เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคือ โพลีเมอร์ซึ่งไม่นำไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จะเกิดปัญหาในการเกิดจุดบวกแสงขึ้น (charge up) จึงต้องมีการเคลือบพื้นผิวของโพลีเมอร์ด้วยอนุภาคทองคำก่อนที่จะนำวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ที่เตรียมได้



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [64]

### 3.4.4 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Energy dispersive x-ray spectroscopy, EDS)

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS) ใช้สำหรับศึกษาธาตุองค์ประกอบและปริมาณของธาตุองค์ประกอบต่าง ๆ ในโพลีเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งเป็นเครื่องมือส่วนขยายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ตั้งแต่ธาตุคาร์บอนจนถึงยูเรเนียม โดยอาศัยความแตกต่างของสเปกตรัมเชิงพลังงานในการแยกความแตกต่างของแต่ละธาตุ หลักการคือ รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดแสงจะเข้าไปชนอิเล็กตรอนของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการคายพลังงานของอิเล็กตรอนวงถัดออกไปในรูปของรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งเป็นสเปกตรัมเชิงพลังงานเฉพาะตัวของแต่ละธาตุ อุปกรณ์ตัววัด (Detector) ก็จะตรวจจับสเปกตรัมเหล่านี้แล้วรายงานผลออกมาทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ใช้เพื่อตรวจสอบปริมาณและธาตุองค์ประกอบของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่เตรียมได้

### 3.4.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ใช้สำหรับศึกษาความเป็นผลึกของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์การในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบรูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง ใช้เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่เตรียมได้[65]



รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [65]

### 3.4.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier - Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

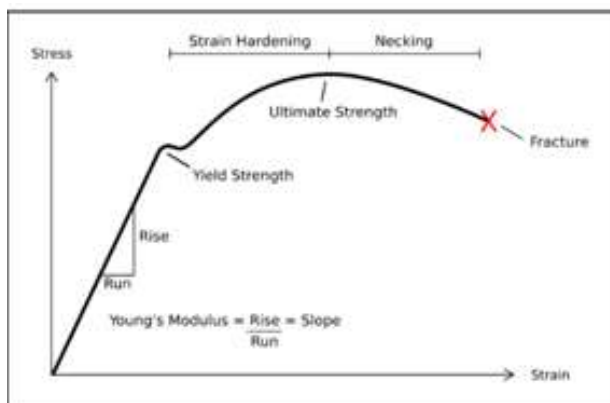
เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ใช้สำหรับศึกษาหมู่ฟังก์ชันภายในโพลิเมอร์ธรรมชาติ น้ำมันชั้น และผงขี้ผึ้ง เพื่อยืนยันกับโครงสร้างทางเคมี โดยจะใช้แสงช่วงอินฟราเรด (infrared, IR) ที่เลขคลื่นตั้งแต่  $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$  กระตุ้นสารตัวอย่างให้เกิดการสั่น (vibration) ทำให้สามารถระบุพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลได้ตามพีคที่เกิดขึ้นที่เลขคลื่นต่าง ๆ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลได้ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (nondestructive) สะดวก ไม่ยุ่งยาก รวดเร็ว ใช้เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของโพลิเมอร์ธรรมชาติที่เตรียมได้ [66]



รูปที่ 3.11 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ [67]

### 3.4.7 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine)

เป็นเครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength), ความทนต่อแรงกดอัด (Compression), การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) หรือค่าโมดูลัส (Modulus) เป็นต้น โดยเครื่องจะออกแรงดึงขึ้นงานด้วยอัตราเร็วคงที่และทำการบันทึกค่าแรงดึง (Tension force) ที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัว (Deformation) ของชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานจะมีการออกแรงต้าน ทำให้ตัววัดแรงในเครื่องทดสอบสามารถวัดแรงต้านนั้นออกมาได้ในหน่วยนิวตัน (N) จะทดสอบจนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน ผลที่ได้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) [68] ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) (ซ้าย) และเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (ขวา) [68]

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแรงดึง (Tensile test) โดยเตรียมชิ้นงานและกำหนดสภาวะของเครื่องทดสอบดังนี้

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

การทดสอบแรงอัด (Compression test) จะเป็นการให้แรงจากภายนอกกระทำกับวัตถุตัวอย่างในแนวแรงทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัตถุตัวอย่าง แล้วเพิ่มแรงขึ้นช้า ๆ อย่างสม่ำเสมอ จนวัตถุตัวอย่างมีความหนาลดลงร้อยละ 50 โดยเตรียมชิ้นงานและกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

- ความหนาของชิ้นงาน 50 มิลลิเมตร
- ความเร็วในการออกแรงอัด 500 มิลลิเมตรต่อนาที
- จำนวนครั้งที่ทดสอบ 10 ครั้ง

### 3.4.8 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial property test)

การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพนียงธรรมชาติที่เตรียมได้ จะใช้วิธี Agar disc diffusion แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากการเกิดโซนยับยั้ง (Inhibition zone) โดยเตรียมตัวอย่างของโพนียงธรรมชาติที่เตรียมได้ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus* และ แกรมลบ *E.coli*

### ผลการวิจัยและการอภิปราย

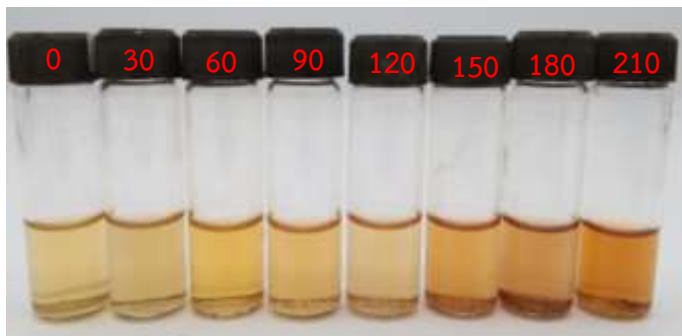
ในบทนี้กล่าวถึงผลของการเตรียม (1) สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยกระบวนการไมโครเวฟโดยใช้น้ำมันจากขมิ้นผง ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพ (2) การเตรียมสารแขวนลอยน้ำมันสด จากนั้น (3) ทำการเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ผสมสารแขวนลอยน้ำมันสดที่ปริมาณต่าง ๆ และ (4) โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมสารแขวนลอยน้ำมันสดกับสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย จากนั้นทำการพิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์สมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การดูดกลืนแสง (UV-Vis) ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เครื่องวิเคราะห์การกระจายและการสะท้อนของแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล (DRS) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (SEM-EDS) นอกจากนี้ยังการทดสอบแรงดึงและแรงกดอัด (Tensile and compression test) รวมทั้งทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ธรรมชาติ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมทั้งหมดที่เตรียมได้

#### 4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

##### 4.1.1 การศึกษาผลของเวลาการให้คลื่นไมโครเวฟในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน

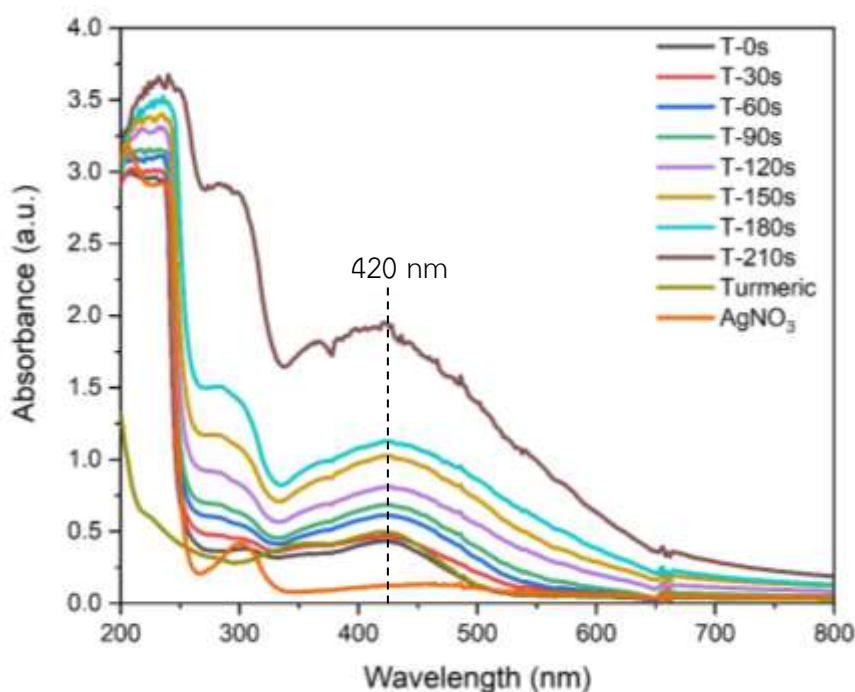
###### 4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

สำหรับการเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะทางกายภาพที่แสดงถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากการใช้ปริมาณน้ำมัน 5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาณ 15 มิลลิลิตร และให้คลื่นไมโครเวฟในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนี้ 0 30 60 90 120 150 180 และ 210 วินาที พบว่าสารผสมระหว่างซิลเวอร์ไนเตรตกับน้ำมันที่ปริมาณต่าง ๆ เมื่อผ่านกระบวนการไมโครเวฟด้วยกำลังไฟ 450 วัตต์ เป็นเวลาที่แตกต่างกัน ทำให้สารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีเหลืองน้ำตาลเข้ม ซึ่งยืนยันเบื้องต้นได้ว่าการเกิดขึ้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโน [64,65] และยังพบว่ามีการเกิดตะกอนเกิดขึ้นในวินาทีที่ 180 และตะกอนมีจำนวนมากขึ้นในวินาทีที่ 210 ดังแสดงในรูปที่ 4.1



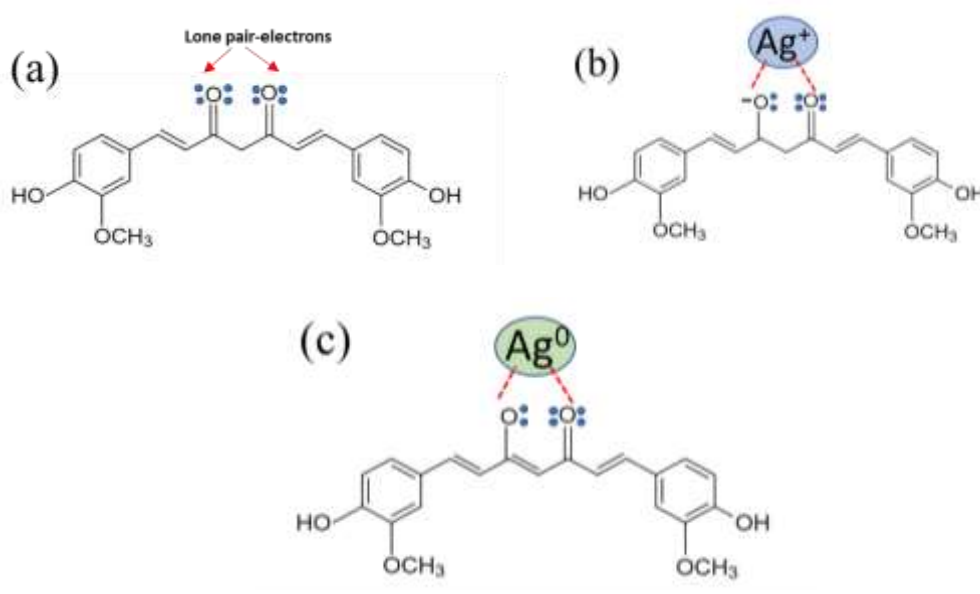
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟโดยใช้เวลาในการให้คลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างกัน ดังนี้ 0 30 60 90 120 150 180 และ 210 วินาที ตามลำดับ

เมื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometry ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า มีพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากปรากฏการณ์เซอร์เฟซ พลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance, SPR) เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับที่ A.M.Elgorban R.Karthik S.G.Balwe และคณะ [64-66] ได้รายงานไว้



รูปที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการใช้ปริมาณน้ำขมิ้น 5 มิลลิลิตรและเวลาในการให้คลื่นไมโครเวฟแตกต่างกัน 0 30 60 90 120 150 180 และ 210 วินาที ด้วยกำลังไฟ 450 วัตต์

โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนนั้นสามารถเกิดได้ทันทีโดยไม่ต้องให้คลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากโมเลกุลของสารประกอบเคอร์คูมิน มีคู่อิเล็กตรอนจากอะตอมของออกซิเจนของหมู่ฟีนอลิกได - คีโตน (Phenolic di - ketone) ดังรูปที่ 4.3 (a) ทำให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างโมเลกุลของสารประกอบเคอร์คูมินและซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ดังรูปที่ 4.3 (b) แล้วจะเกิดเป็นนิวคลีเอชัน (Nucleation) ของ  $Ag^0$  ดังรูปที่ 4.3 (c) ส่งผลทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของนิวคลีเอชันของ  $Ag^0$  และเกิดเป็นอนุภาคซิลเวอร์นาโน [66-70] นอกจากนี้ความเข้ม (Intensity) ของฟลักซ์เอกซ์เรย์นี้ยังเพิ่มขึ้นตามเวลาในการให้คลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากการให้คลื่นไมโครเวฟเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับระบบ จึงเพิ่มโอกาสที่  $Ag^+$  และโมเลกุลของเคอร์คูมินจะเกิดอันตรกิริยากันแล้วเกิดเป็น  $Ag^0$  และนำไปสู่การเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโนในที่สุด



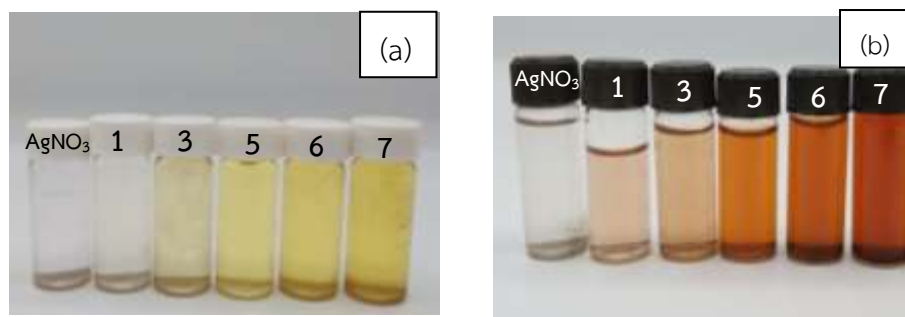
รูปที่ 4.3 (a) โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเคอร์คูมิน, (b) อันตรกิริยาระหว่างซิลเวอร์ไอออนกับโมเลกุลเคอร์คูมิน และ (c) นิวคลีเอชันของ  $Ag^0$  ที่เกิดบนโมเลกุลเคอร์คูมินในระหว่างกระบวนการไมโครเวฟ

ถึงแม้ว่าที่เวลาในการให้คลื่นไมโครเวฟ 210 และ 180 วินาที จะทำให้ค่าความเข้มของฟลักซ์ที่ตำแหน่ง 420 นาโนเมตรที่สูง แต่พบว่าในสภาวะนี้ทำให้เกิดตะกอนขึ้นในปริมาณที่มากเพิ่มขึ้น จึงทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากเงื่อนไขเหล่านี้มีความเสถียรต่ำ ไม่สามารถเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิต้องได้นาน ในขณะที่การให้คลื่นไมโครเวฟที่เวลา 150 วินาที จะมีค่าความเข้มของฟลักซ์เอกซ์เรย์รองลงมา แต่พบว่าไม่มีตะกอนใด ๆ เกิดขึ้นและสามารถเก็บรักษา ณ อุณหภูมิต้องได้นาน จึงได้เลือกเงื่อนไขนี้ไปศึกษาผลของปริมาณน้ำขมในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนต่อไป

#### 4.1.2 การศึกษาผลของปริมาณน้ำมัน ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน

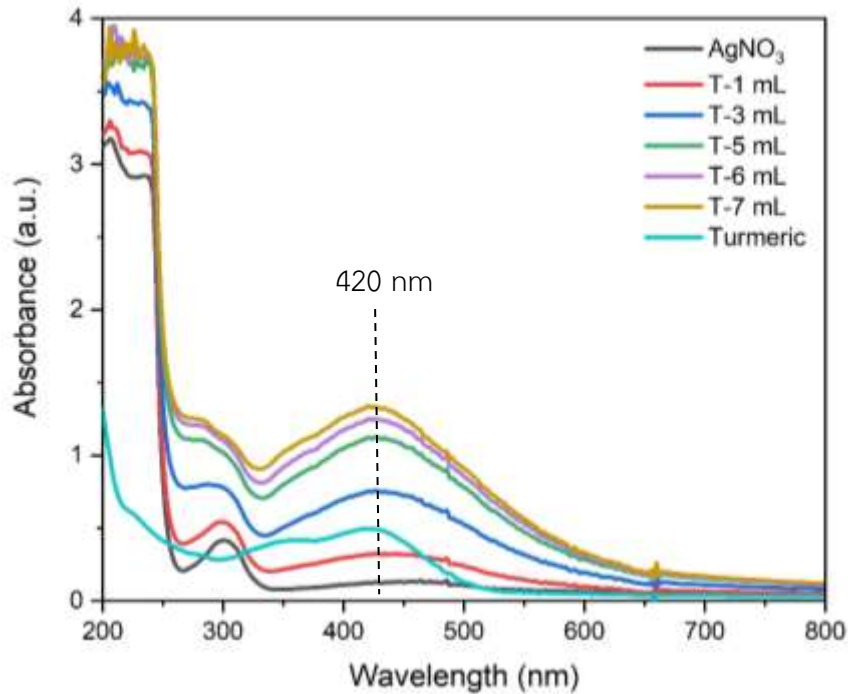
##### 4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากน้ำมันที่ปริมาณแตกต่างกัน ดังนี้ 0, 1, 3, 5, 6 และ 7 มิลลิลิตร พบว่าสารผสมระหว่างซิลเวอร์ไนเตรดกับน้ำมันที่ปริมาณต่าง ๆ เมื่อผ่านกระบวนการไมโครเวฟด้วยกำลังไฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 150 วินาที ทำให้สารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีเหลืองน้ำตาล และสีเข้มขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำมันเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด สารแขวนลอยน้ำมันผสมซิลเวอร์ไนเตรด (a) ก่อนกระบวนการไมโครเวฟ และสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์ไนเตรด (b) หลังกระบวนการไมโครเวฟ

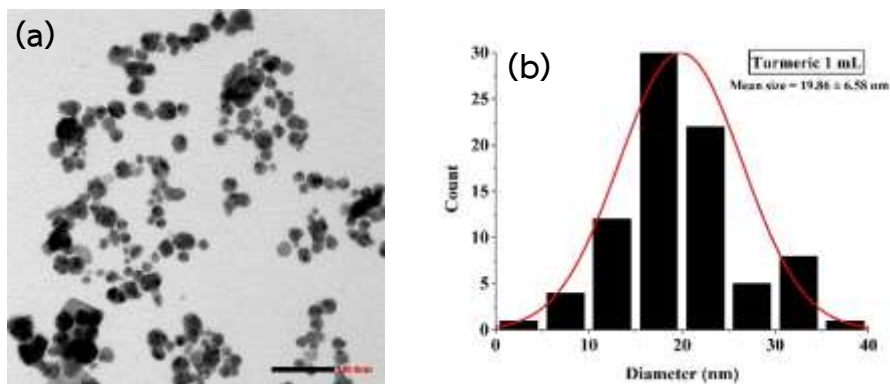
เมื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometry ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่ามีพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากปรากฏการณ์เซอร์เฟส พลาสมอนเรโซแนนซ์ (SPR) เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 420 นาโนเมตร นอกจากนั้นความเข้ม (Intensity) ของพีคเอกลักษณ์นี้ยังเพิ่มขึ้นตามปริมาณของน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย จึงสามารถยืนยันการเกิดขึ้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของน้ำมัน ซึ่งน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มการเกิดนิวเคลียสขึ้น ตามด้วยการเกิดอนุภาคซิลเวอร์นาโน และพบว่าสีของสารแขวนลอยเป็นสีเหลืองน้ำตาลยังแสดงให้เห็นว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนเหล่านั้นมีรูปทรงคล้ายทรงกลมอีกด้วย [69-71] อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดที่ปราศจากน้ำมัน พบว่าหลังจากผ่านกระบวนการไมโครเวฟแล้ว ไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ตำแหน่ง 420 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าสารประกอบเคอร์คูมินในน้ำมันสามารถเป็นตัวรีดิวซ์  $Ag^+$  ให้เป็น AgNPs ได้ภายใต้กระบวนการไมโครเวฟ นอกจากนั้นโปรตีนซิสเทอีน (Cysteine) หรือกลุ่มอะมิโนอิสระ (Free amino group) ที่อยู่ในน้ำมันยังทำหน้าที่เป็นตัวช่วยรักษาเสถียรภาพ (Stabilizer) ของ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้อีกด้วย [57,72,73]



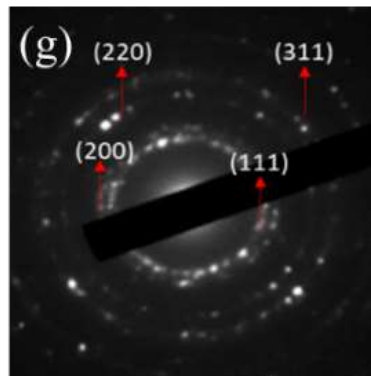
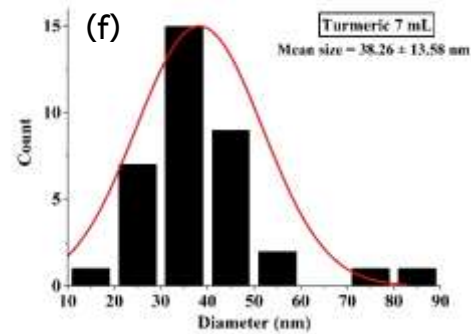
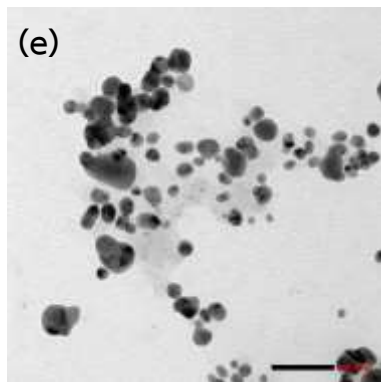
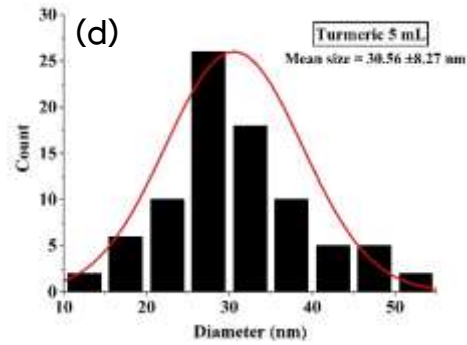
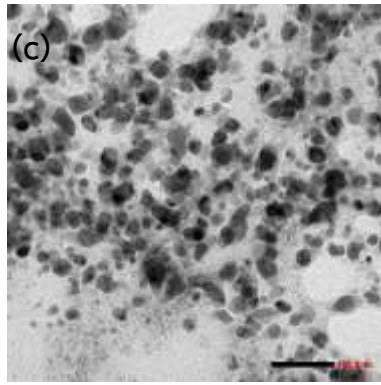
รูปที่ 4.5 การดูดกลืนแสงของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ได้จากการใช้น้ำมันในปริมาณที่ต่างต่างกัน คือ 0 1 3 5 6 และ 7 mL หลังผ่านกระบวนการไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ เวลา 150 วินาที

#### 4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ผลการวิเคราะห์ขนาดและอนุภาคของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิค TEM ภายใต้เงื่อนไขใช้น้ำมันในปริมาณที่ต่างต่างกันคือ 1 5 และ 7 มิลลิลิตร แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (a) ขนาดของการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ (b) จากปริมาณน้ำมัน 1 มิลลิลิตร (มีต่อ)



รูปที่ 4.6 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (c และ e) ขนาดของการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้ (d และ f) จากปริมาณน้ำมัน 5 และ 7 มิลลิลิตร ตามลำดับ และวงแหวนการกระจายตัว (SAED) แสดงเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน (g)

จากรูปที่ 4.6 (a, c และ e) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้จากปริมาณน้ำมัน 1 5 และ 7 มิลลิลิตร ตามลำดับ พบว่าหลังจากได้รับคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 150 วินาที อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกิดขึ้นมีรูปร่างคล้ายรูปทรงกลม นอกจากนั้นจากรูปที่ 4.5 (b d และ f) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $19.86 \pm 6.58$   $30.56 \pm 8.27$  และ  $38.26 \pm 12.58$  นาโนเมตร เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นเป็น 1 5 และ 7 มิลลิลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณ

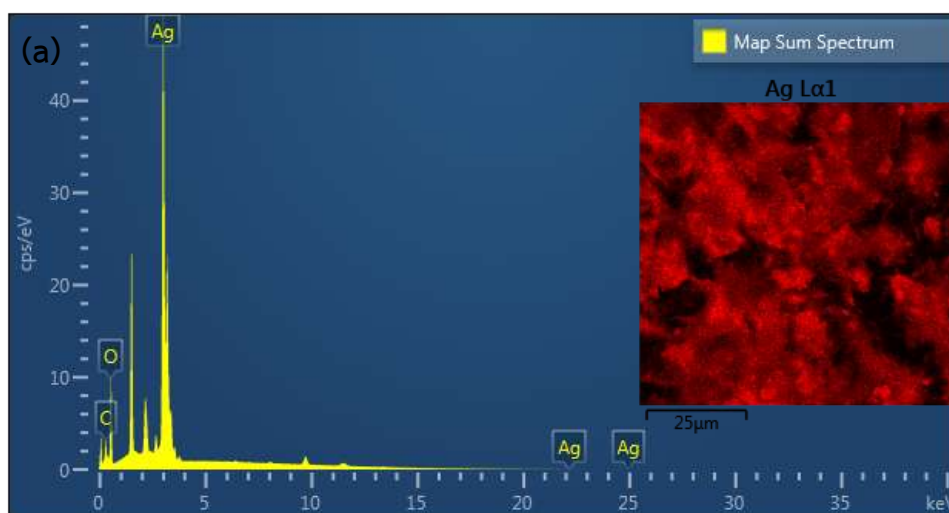
ของน้ำมันที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นจากรูปที่ 4.3 (g) ยังเป็นการยืนยันการเกิดขึ้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยวงแหวนการกระจายตัวเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีระนาบผลึก {111} {200} {220} และ {311} ซึ่งเป็นระนาบผลึกของโครงสร้างซิลเวอร์ face-centered cubic (fcc) [57,74-75]

ถึงแม้ว่าที่ปริมาณการใช้น้ำมัน 6 และ 7 มิลลิลิตร จะทำให้ค่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 420 นาโนเมตรที่สูง แต่พบว่าในสภาวะนี้ทำให้เกิดตะกอนขึ้นในปริมาณที่มากเพิ่มขึ้น จึงทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากเงื่อนไขเหล่านี้มีความเสถียรต่ำ ไม่สามารถเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิต้องได้นาน ในขณะที่การใช้น้ำมันปริมาณ 5 มิลลิลิตร จะมีค่าความเข้มของพีคเอกลักษณ์รองลงมา แต่พบว่าไม่มีตะกอนใด ๆ เกิดขึ้นและสามารถเก็บรักษา ณ อุณหภูมิต้องได้นาน จึงได้เลือกเงื่อนไขไปศึกษาผลของปริมาณน้ำมันในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนต่อไป

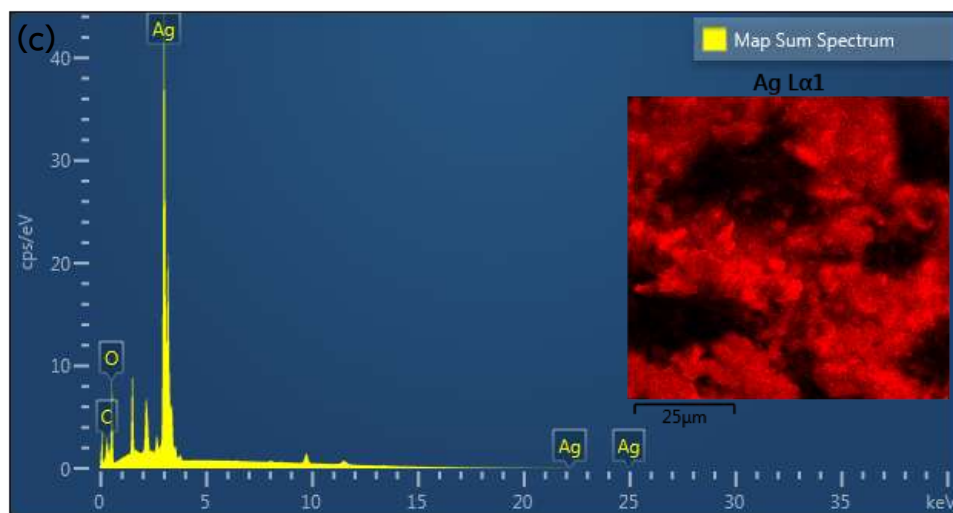
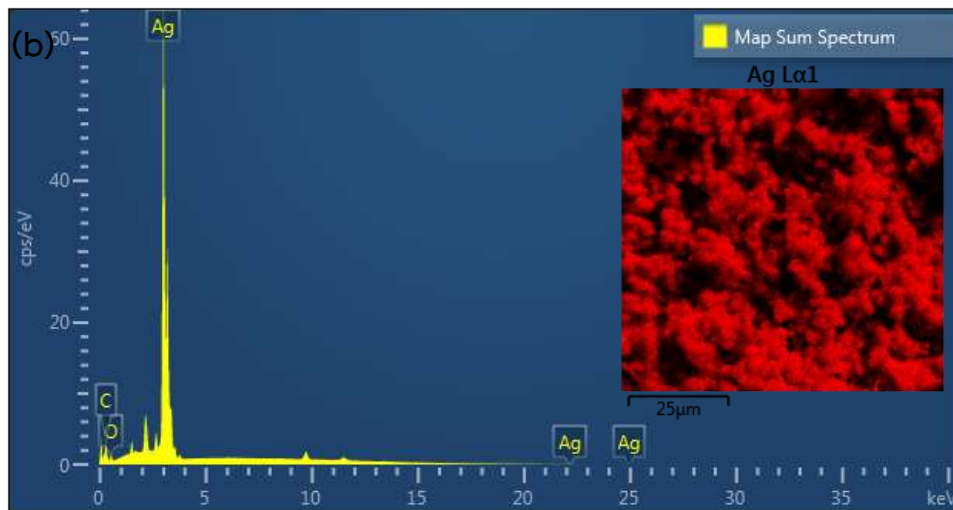
ดังนั้นเงื่อนไขการใช้น้ำมันปริมาณ 5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต เข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาณ 15 มิลลิลิตร แล้วนำไปผ่านกระบวนการไมโครเวฟที่กำลังไฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 150 วินาที จึงเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน เพื่อนำไปเติมลงในโพลีเมยางธรรมชาติเพิ่มเติมสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่อไป

#### 4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ทำกรหดยดสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไป ด้วยเทคนิค EDS เพื่อยืนยันการเกิดขึ้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 (a) EDS spectrum และองค์ประกอบของธาตุในอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากน้ำมันปริมาณ 1 มิลลิลิตร (มีต่อ)



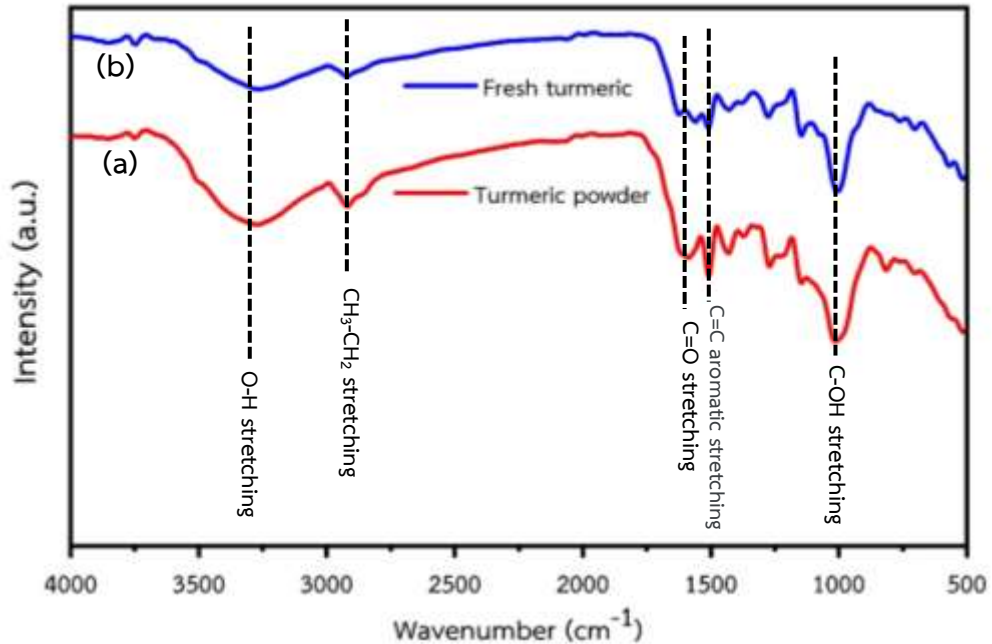
รูปที่ 4.7 (ต่อ) (b และ c) EDS spectrum และองค์ประกอบของธาตุในอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากน้ำมันปริมาณ 5 และ 7 มิลลิลิตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้จากปริมาณน้ำมันที่ต่างกันคือ 1 5 และ 7 มิลลิลิตรนั้น เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS นั้น พบว่าประกอบไปด้วยธาตุซิลเวอร์ (Ag) ที่ตำแหน่งประมาณ 3.2 keV จึงยืนยันได้ว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยน้ำมัน ผ่านกระบวนการไมโครเวฟ

## 4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงขมิ้นชันและน้ำมันขมิ้นชันสด

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของผงขมิ้นชัน และน้ำมันขมิ้นชันสดแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) ผงขมิ้นชันเชิงการค้า และ (b) ผงขมิ้นชันจากน้ำมันขมิ้นชันสด

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในผงขมิ้นชัน และน้ำมันขมิ้นชันสด

หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups)	เลขคลื่น (Wavenumber, $\text{cm}^{-1}$ )
O-H stretching	3000-3600
$\text{CH}_3\text{-CH}_2$ stretching	2900
C=O stretching	1600
C=C aromatic stretching	1510
C-OH stretching	1020

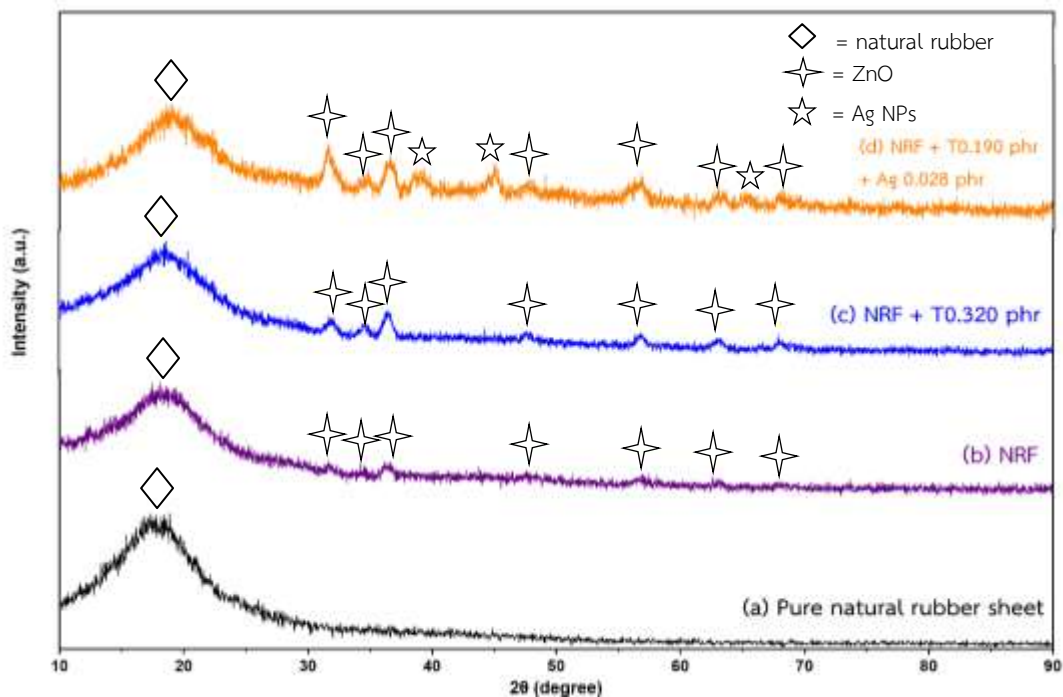
จากรูปที่ 4.8 พบว่า (a) ผงขมิ้นชัน และ (b) น้ำมันขมิ้นชันสด จะแสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ ที่เลขคลื่นประมาณ  $3000\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะออกซิเจนต่อกับไฮโดรเจน (O-H stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $2900\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบยืดของคาร์บอนพันธะเดี่ยวต่อกับไฮโดรเจน 3 ตัว และ 2 ตัว ( $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1600\text{ cm}^{-1}$

เป็นการสั่นแบบยืดของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group stretching) เลขคลื่นประมาณ  $1510\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C=C ในวงอะโรมาติก (C=C aromatic stretching) เลขคลื่นประมาณ  $1020\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะคาร์บอนต่อกับหมู่ไฮดรอกซิล (C-OH stretching) [78] ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของขมิ้นชันคือสารประกอบในกลุ่มเคอร์คูมิน ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.3.2 รูปที่ 2.13

### 4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเมอร์ธรรมชาติผสม

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน

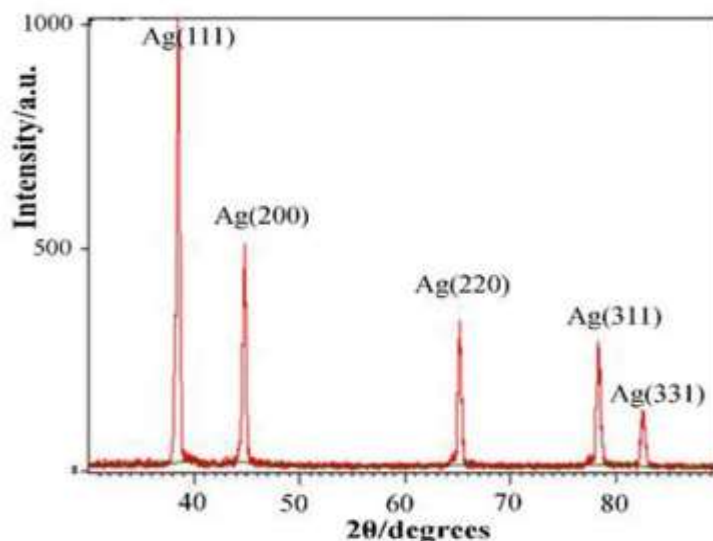
ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสด และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 XRD pattern ของ (a) แผ่นยางธรรมชาติบริสุทธิ์ (b) โพลีเมอร์ธรรมชาติ (c) โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสดที่ปริมาณ 0.320 phr และ (d) โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.028 phr

จากรูปที่ 4.9 ผลการศึกษาลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า (a) แผ่นยางธรรมชาติบริสุทธิ์ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่ตำแหน่ง  $2\theta = 19^\circ$  (b - d) ปรากฏช่วงกว้างของพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่  $2\theta = 19^\circ$  และยังพบพีคเล็ก ๆ ที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31^\circ 34^\circ 36^\circ 47^\circ 56^\circ 62^\circ$  และ  $66^\circ$  ตรงกับพีคเอกลักษณ์ของ ZnO (JCPDS No.00-036-1451) แสดงถึงระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ โดย ZnO ในโพลี

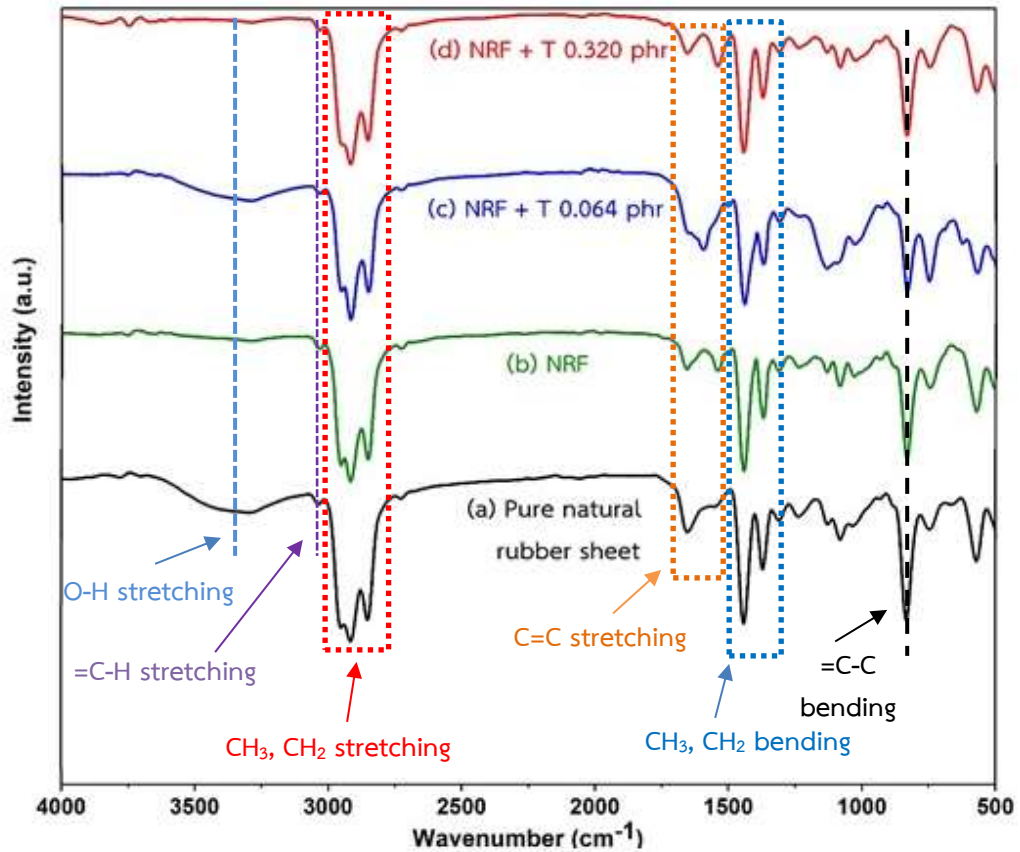
ยางธรรมชาติ นั้น พบได้จากการเติมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในการคงรูปของฟองยาง ส่วนพีค (c) ที่เป็นโพลียเอทิลีนที่ผสมน้ำมันชั้นสัดที่ปริมาณ 0.320 phr พบว่ามีพีคที่เกิดขึ้นเหมือนกับพีคของโพลียเอทิลีน และความเป็นผลึกของพีค ZnO สูงขึ้น เนื่องจากการเติมน้ำมันชั้นลงไปทำให้ความหนืดของระบบลดลง จึงทำให้ ZnO กระจายตัวในโพลียเอทิลีนได้ดีขึ้น แต่ไม่พบพีคการเลี้ยวเบนของไขมัน ส่วนพีค (d) ที่เป็นโพลียเอทิลีนที่ผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.028 phr พบว่ามีพีคที่เกิดขึ้นเหมือนกับพีคของโพลียเอทิลีน พีคของ ZnO มีความเป็นผลึกสูงขึ้น เนื่องจากการเติมทั้งน้ำมันชั้นและอนุภาคซิลเวอร์นาโน จึงทำให้ความหนืดของระบบลดลง ZnO จึงกระจายตัวในโพลียเอทิลีนได้ดีขึ้น และพบพีคของอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่มีพีคเอกลักษณ์อยู่ที่ตำแหน่ง  $2\theta = 39^\circ 45^\circ 65^\circ 79^\circ$  และ  $82^\circ$  (JCPDS No. 04-0783) ซึ่งตรงกับระนาบ (111) (200) (220) (311) และ (331) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ F.Heidarpour และคณะ [79]



รูปที่ 4.10 XRD pattern ของซิลเวอร์นาโนจากงานวิจัยของ F.Heidarpour และคณะ [79]

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล

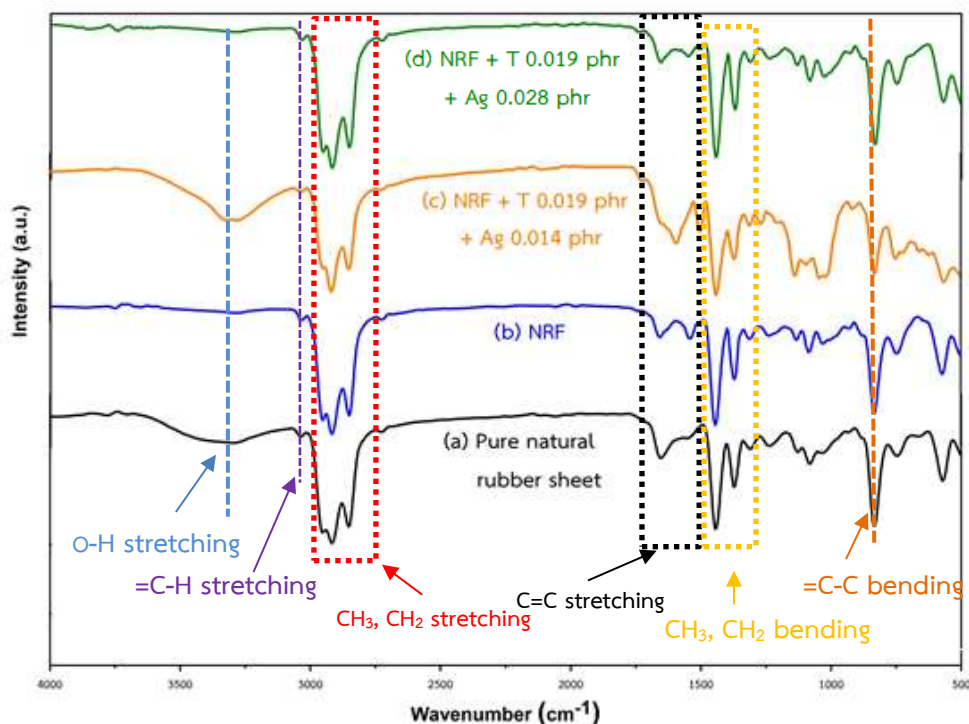
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของโพลียเอทิลีนที่ผสมน้ำมันชั้นที่ปริมาณต่าง ๆ และโพลียเอทิลีนที่ผสมน้ำมันชั้นกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.12 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.11 กราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) ยางธรรมชาติบริสุทธิ์ (b) โฟมยางธรรมชาติ (c) และ (d) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสดที่ปริมาณ 0.064 และ 0.320 phr ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.11 (a) ยางธรรมชาติบริสุทธิ์ จะแสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ ประมาณ  $3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะออกซิเจนต่อกับไฮโดรเจน (O-H stretching) ที่มาจากความชื้นระหว่างทำการทดสอบ ที่ช่วงเลขคลื่น  $3030\text{ cm}^{-1}$  เป็นช่วงการสั่นของคาร์บอนพันธะคู่ต่อไฮโดรเจน (=C-H stretching) บริเวณช่วงเลขคลื่น  $2920$  และ  $2860\text{ cm}^{-1}$  เป็นช่วงการสั่นของคาร์บอนพันธะเดี่ยวต่อกับไฮโดรเจน 3 ตัว และ 2 ตัว ( $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  stretching) ถัดมาประมาณเลขคลื่น  $1660\text{ cm}^{-1}$  เป็นช่วงการสั่นของคาร์บอนพันธะคู่ต่อคาร์บอนของหมู่ไอโซพรีน (isoprene group) ของยางธรรมชาติ (C=C stretching) ช่วงเลขคลื่น  $1380$  และ  $1460\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบงอของคาร์บอนพันธะเดี่ยว ต่อไฮโดรเจน 2 และ 3 ตัว ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$  bending) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบที่เลขคลื่น  $840\text{ cm}^{-1}$  ที่เป็นการสั่นแบบงอของคาร์บอนพันธะคู่ต่อคาร์บอน (C=C bending) หรือเป็นช่วงการสั่นที่เป็นเอกลักษณ์ของคาร์บอนพันธะคู่มิโครโครงสร้างแบบซิส (cis-double bond carbon) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ [80,81] ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.1.2 รูปที่ 2.2 ในขณะที่ (b - d) โฟมยางธรรมชาติ โฟมยางธรรมชาติที่ผสมน้ำมันชั้นสดที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0.064 และ 0.320 phr ตามลำดับ จะพบเพียงแถบการสั่นของโมเลกุลยางธรรมชาติเช่นเดียวกับพิก (a) และ (c และ d) ไม่พบพีคการสั่นของโมเลกุลเคอร์คูมินที่อยู่ในน้ำมันชั้นสด เนื่องจากเติมลงไปโฟมยาง

ธรรมชาติในปริมาณที่น้อยจึงถูกพิคของไอโซพรีนในยางธรรมชาติบดบัง และการเติมน้ำมันชั้นลงไปนั้น ไม่ทำให้พิคของไอโซพรีนเปลี่ยนไป ดังนั้นการเติมน้ำมันชั้นลงไปโนโพมยางธรรมชาติ จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลไอโซพรีนในยางธรรมชาติ



**รูปที่ 4.12** กราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) ยางธรรมชาติบริสุทธิ์ (b) โฟมยางธรรมชาติ (c) และ (d) โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์ที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr ตามลำดับ

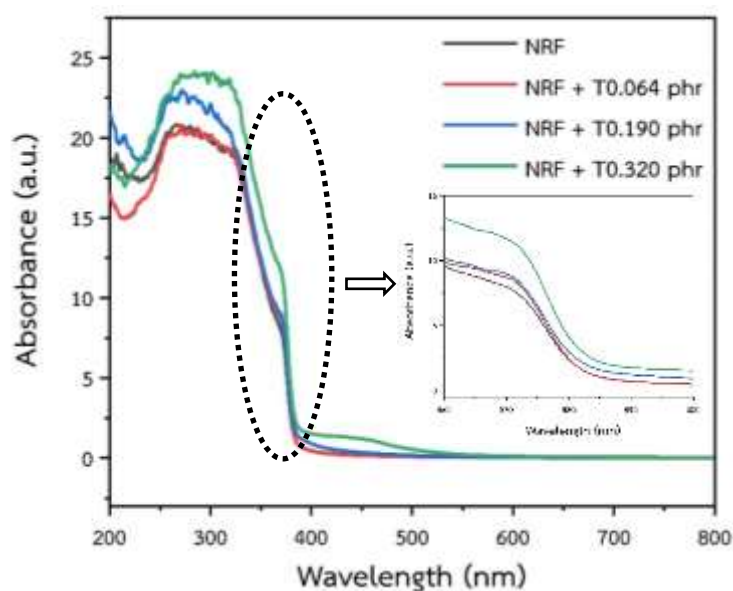
จากรูปที่ 4.12 (a) ยางธรรมชาติบริสุทธิ์และ (b) โฟมยางธรรมชาติ แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญตรงกับหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ ส่วน (c) และ (d) เป็นโฟมยางธรรมชาติที่ผสมน้ำมันชั้นที่ปริมาณ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.014 และ 0.028 phr ตามลำดับ ก็จะไม่พบแถบการสั่นของโมเลกุลของไอโซพรีนในยางธรรมชาติเป็นหลัก และไม่พบแถบการสั่นของโมเลกุลเคอร์คูมินที่อยู่ในน้ำมันชั้นสดและแถบการสั่นของอนุภาคซิลเวอร์นาโน เนื่องจากปริมาณที่ใส่ลงไปโนโพมยางธรรมชาตินั้นมีปริมาณน้อยทำให้แถบการสั่นเหล่านี้ถูกบดบังด้วยแถบการสั่นของยางธรรมชาติ จึงไม่ปรากฏแถบการสั่นของกราฟอนุภาคซิลเวอร์นาโนในเทคนิค FT-IR นอกจากนี้การเติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปก็ไม่ทำให้โมเลกุลไอโซพรีนในยางธรรมชาติเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสัด และโพลีเอทิลีนผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups)	เลขคลื่น (Wavenumber, $\text{cm}^{-1}$ )
O-H stretching	3300
=C-H stretching	3030
$\text{CH}_3$ , $\text{CH}_2$ stretching	2920-2960
C=C stretching	1660
$\text{CH}_3$ , $\text{CH}_2$ bending	1380-1460
=C-C bending	840

#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสง

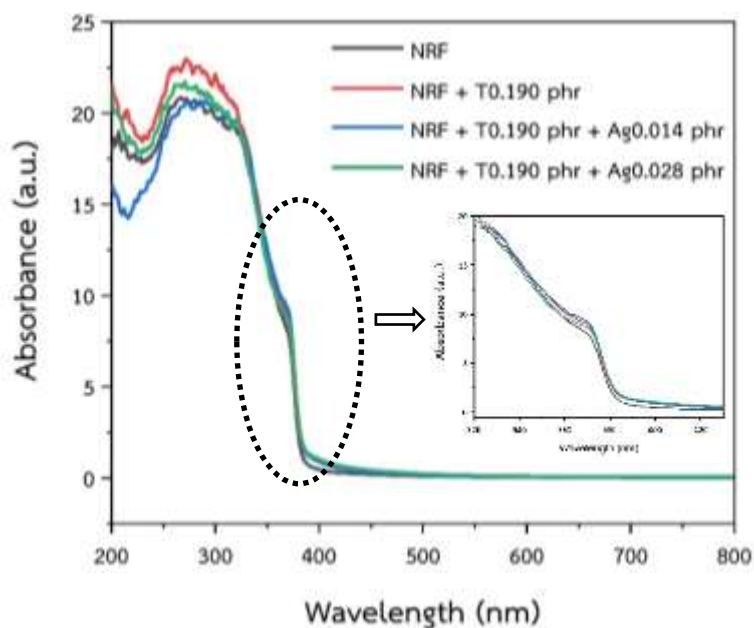
ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง (UV – visible diffuse-reflectance spectrophotometer, UV-DRS) ของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสัดที่ปริมาณต่าง ๆ และโพลีเอทิลีนผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.13 – 4.14



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโพลีเอทิลีน และโพลีเอทิลีนผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสัดที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0.064 0.190 และ 0.320 phr ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.13 พบว่าโพลีเอทิลีนที่ผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสัดที่ปริมาณ 0.064 phr มีค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับกับโพลีเอทิลีน และเมื่อผสมน้ำขี้ผึ้งในปริมาณที่มากขึ้นคือ 0.190 และ 0.320 phr พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มสูงขึ้นในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 – 500 นาโน

เมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนช่วงของแสงสีม่วง ทำให้เห็นสีของโพลีเมอร์ชาติเป็นสีเหลืองเข้มขึ้น เมื่อปริมาณของน้ำขมที่เติมลงไปมากขึ้น



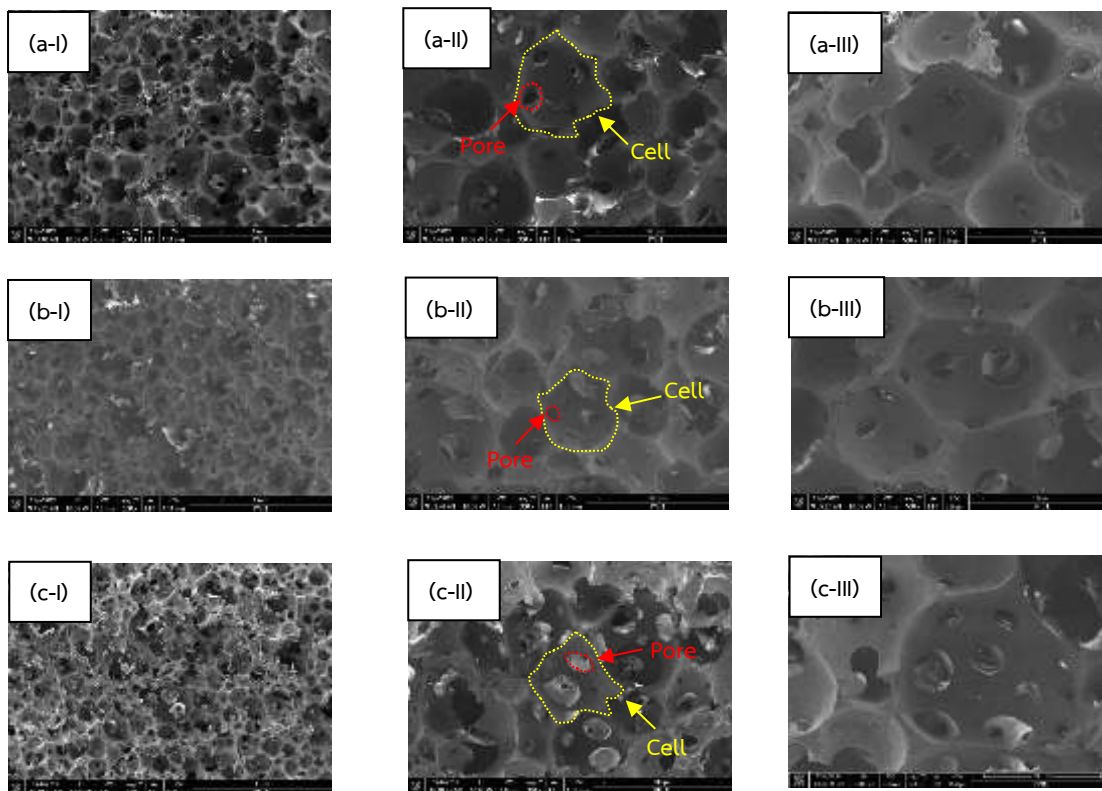
**รูปที่ 4.14** สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโพลีเมอร์ชาติ โพลีเมอร์ชาติผสมน้ำขมชั้นสดที่ปริมาณ 0.190 phr และ โพลีเมอร์ชาติผสมน้ำขมชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.014 และ 0.028 phr

จากรูปที่ 4.14 พบว่าโพลีเมอร์ชาติที่ผสมน้ำขมชั้นสดที่ปริมาณ 0.190 phr มีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าโพลีเมอร์ชาติ และเมื่อเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปโพลีเมอร์ชาติที่ผสมน้ำขมในปริมาณที่ต่างกัันคือ 0.014 และ 0.028 phr พบว่าไม่ทำการให้ค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไป เนื่องจากเติมลงไปปริมาณที่น้อย

#### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาค

ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา และขนาดของเซลล์กับรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ของโพลีเมอร์ชาติ โพลีเมอร์ชาติผสมน้ำขมชั้นสดที่ปริมาณต่าง ๆ และโพลีเมอร์ชาติผสมน้ำขมชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ ที่บริเวณพื้นผิว (Surface) ของสารตัวอย่าง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.20 และตารางที่ 4.3

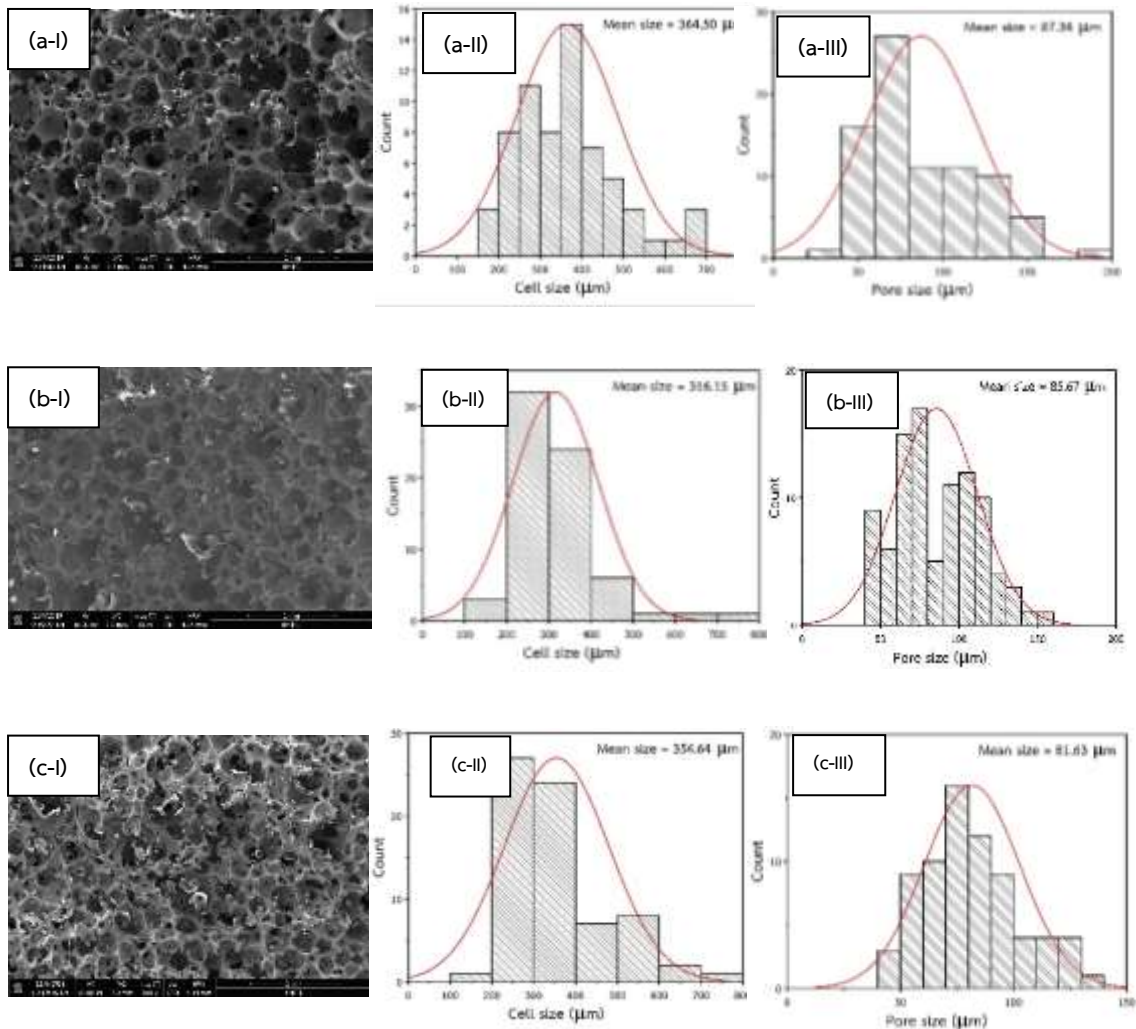
#### 4.3.4.1 สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟองที่ต่างกันคือ 3 5 และ 7 นาที



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟองแตกต่างกันคือ (a) 3 นาที (b) 5 นาที และ (c) 7 นาที ด้วยกำลังขยาย (I) 100x (II) 300x และ (III) 500x ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.15 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่เตรียมได้จากการใช้เวลาในการตีฟองที่ต่างกัน พบว่า โฟมที่ได้นั้นมีความขรุขระ มีเซลล์รูปร่างคล้ายทรงกลมและมีการกระจายตัวของขนาดของเซลล์ (Cell size) ที่แตกต่างกัน และภายในเซลล์ประกอบไปด้วยรูพรุน (Pore) รูปร่างคล้ายทรงกลมกระจายตัวอยู่ในเซลล์ ซึ่งแต่ละเซลล์มีการเชื่อมต่อและขาดออกจากกัน ในบางช่วง ซึ่งคล้ายกับลักษณะของโพลีเมอร์ธรรมชาติในงานวิจัยของ Sanit Sirikulchaikij และคณะ [82] โดยลักษณะของเซลล์ที่ได้จากการใช้เวลาในการตีฟอง 7 นาทีจะมีการเชื่อมต่อกันของเซลล์น้อยที่สุดเนื่องจากใช้เวลาในการตีฟองมากเกินไป ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย รongลงมาเป็นที่เวลา 5 และ 3 นาที ตามลำดับ

เมื่อใช้โปรแกรม Image - J เพื่อทำการหาการกระจายตัวของขนาดของเซลล์และรูพรุนของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟองต่างกันคือ 3 5 และ 7 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟองแตกต่างกันคือ (a) 3 นาที (b) 5 นาที และ (c) 7 นาที (II) กราฟการกระจายตัวของขนาดของเซลล์ และ (III) กราฟการกระจายตัวของขนาดของรูพรุน

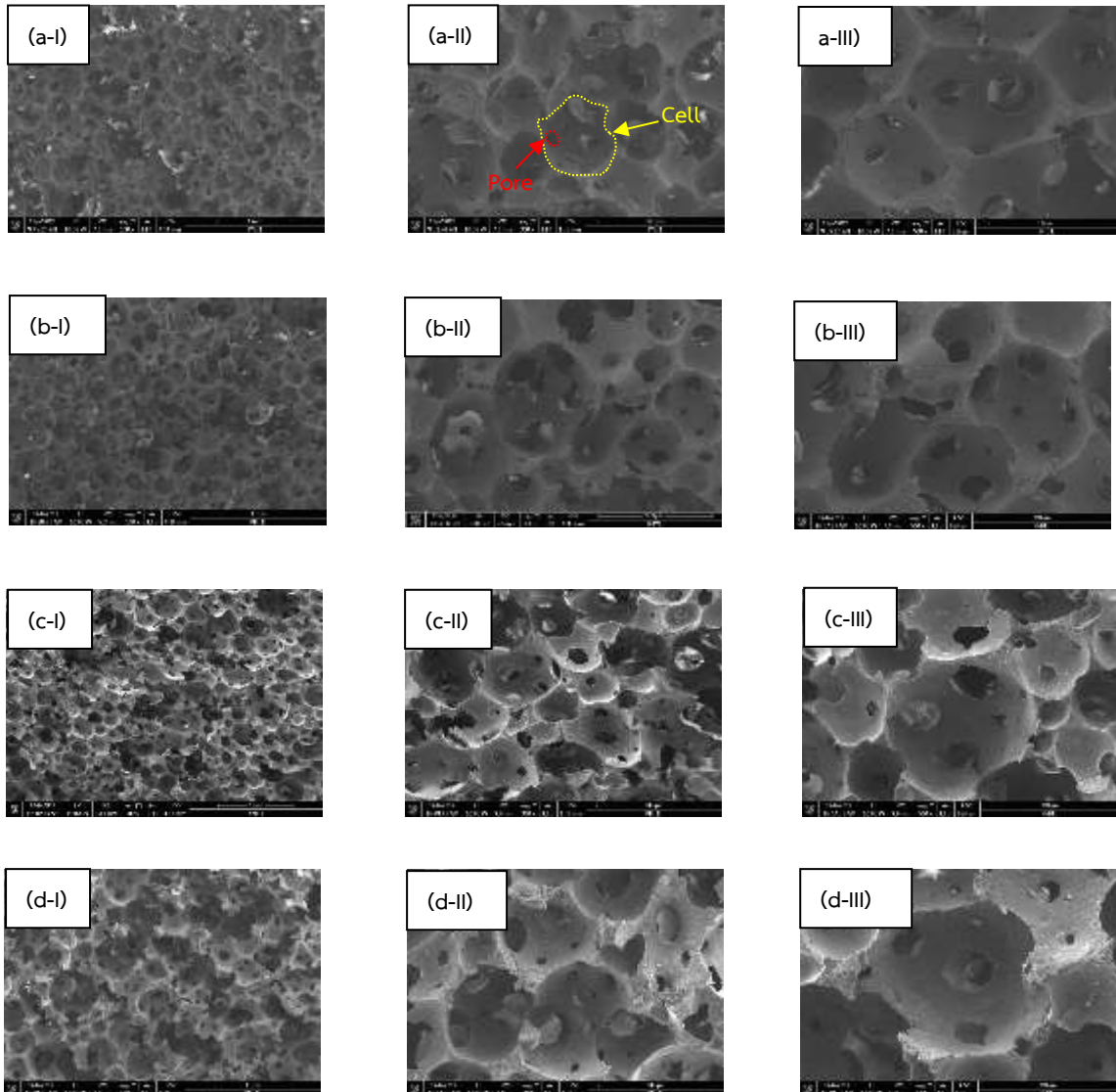
จากรูปที่ 4.16 โฟมยางธรรมชาติใช้เวลาในการตีฟองแตกต่างกัน พบว่าที่เวลา 3 นาที มีขนาดของเซลล์ตั้งแต่ 150 – 700 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยของเซลล์อยู่ที่ 364.50 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.16 (a-II) มีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 25 – 200 ไมโครเมตร และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 87.34 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.16 (a-III) ส่วนที่เวลา 5 นาที มีขนาดของเซลล์ตั้งแต่ 100 – 800 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยของเซลล์อยู่ที่ 316.15 ไมโครเมตรดังรูปที่ 4.16 (b-II) มีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 25 – 175 ไมโครเมตร และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 85.67 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.16 (b-III) และที่เวลา 7 นาที มีขนาดของเซลล์ตั้งแต่ 100 – 800 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยของเซลล์อยู่ที่ 356.64 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.16 (c-II) ขนาดรูพรุนตั้งแต่ 25 – 125 ไมโครเมตร และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 81.63 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.16 (c-III)

จากผลดังกล่าว การตีฟองจะทำให้เกิดเซลล์ที่มีขนาดที่ค่อนข้างแตกต่างกันมากขึ้นมาก่อน และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ขนาดของฟองยาเซลล์มีขนาดเล็กลงและมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

สุดท้ายแล้วเซลล์ก็จะเริ่มรวมตัวกันจนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นเวลาจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดขนาดของเซลล์ของโฟมยางธรรมชาติ ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานได้

เนื่องจากโฟมยางธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟอง 5 นาที มีขนาดเฉลี่ยของเซลล์เล็กที่สุด จึงเลือกเงื่อนไขนี้ไปศึกษาในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสต่อต่อไป

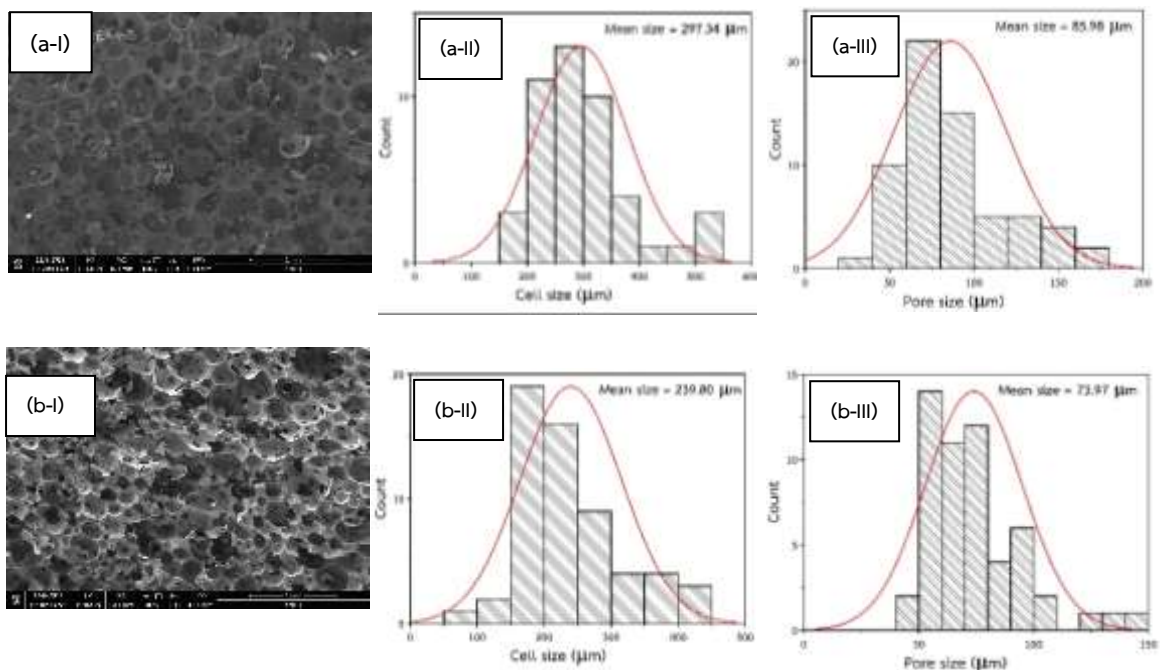
4.3.4.2 สัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติ และโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสต่อ  
ที่ปริมาณน้ำมันชั้นสต่อแตกต่างกันคือ 0.064 0.190 และ 0.320 phr



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของ (a) โฟมยางธรรมชาติ และโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสต่อ ที่ใช้ปริมาณน้ำมันชั้นสต่อต่างกันคือ (b) 0.064 (c) 0.190 และ (d) 0.320 phr ด้วยกำลังขยาย (I) 100x (II) 300x และ (III) 500x

จากรูปที่ 4.17 ผลการศึกษาลักษณะสัมพันธ์ฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) ของโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัด ที่ใช้ปริมาณน้ำมันชั้นสัดต่างกันคือ 0.064, 0.190 และ 0.320 phr พบว่าโฟมยางธรรมชาติสามารถเข้ากันได้ดีกับน้ำมันชั้นสัด เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของทั้งไอโซพรีนในยางธรรมชาติ และเคอร์คูมินในน้ำมันชั้นสัดต่างก็มีบริเวณที่เป็นพันธะคู่ จึงสามารถที่จะเกิด  $\pi$ - $\pi$  stacking interaction กันได้ ทำให้เกิดการเข้ากันเป็นเนื้อเดียวของโฟมยางธรรมชาติกับน้ำมันชั้นสัด จึงสามารถสังเกตลักษณะของโฟมยางธรรมชาติที่ผสมน้ำมันชั้นสัดมีลักษณะคล้ายคลึงกับโฟมยางธรรมชาติ คือยังมีลักษณะของเซลล์เป็นรูปร่างคล้ายทรงกลม และในเซลล์มียังคงมีรูพรุนอยู่เช่นเดิม แต่โฟมยางธรรมชาติที่มีการเติมน้ำมันชั้นสัดปริมาณ 0.320 phr หรือคิดเป็นปริมาตรคือ 15 มิลลิลิตรนั้น พบว่าความต่อเนื่องของเซลล์นั้นพบได้น้อยมาก จะเห็นเป็นเซลล์ที่รูปร่างที่ไม่สมบูรณ์และขาดความต่อเนื่องกัน เนื่องจากปริมาตร 15 มิลลิลิตรของน้ำมันชั้นสัดนั้นมากเกินไป ทำให้ฟองยางที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการตีฟองนั้นยุบตัวลงไป จึงทำให้เซลล์นั้นขาดความต่อเนื่องดังรูปที่ 4.17 (c-I)

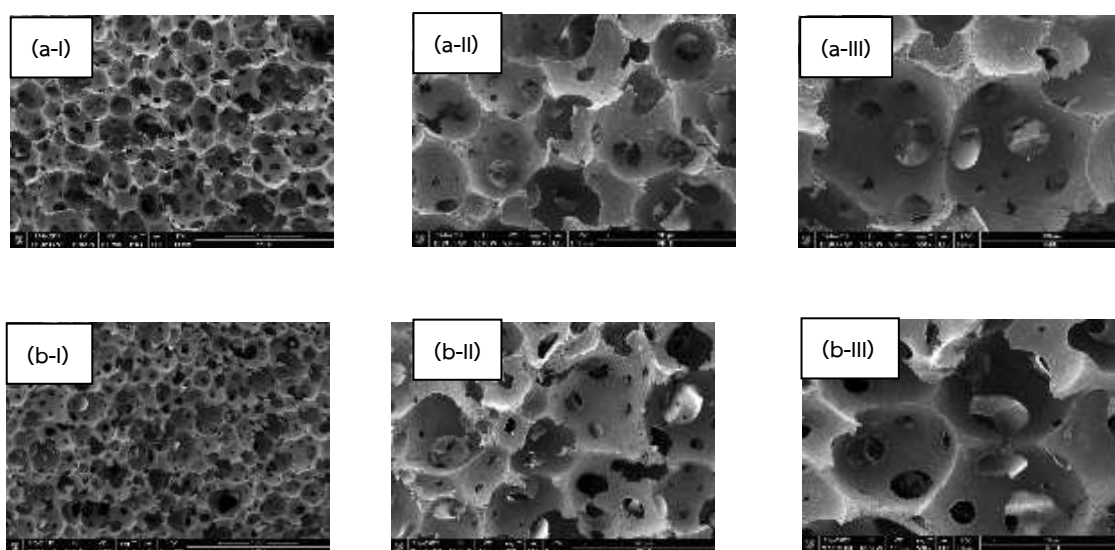
เมื่อใช้โปรแกรม Image - J เพื่อทำการหาการกระจายตัวของขนาดของเซลล์และรูพรุนของโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัด ที่ใช้ปริมาณน้ำมันชั้นสัดต่างกันคือ 0.064 และ 0.190 phr ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.18 ส่วนโฟมยางธรรมชาติที่ผสมน้ำมันชั้นสัดปริมาณ 0.320 phr ไม่สามารถวัดขนาดของเซลล์และรูพรุนได้ เนื่องจากขาดความต่อเนื่องของเซลล์



**รูปที่ 4.18** ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้ปริมาณของน้ำมันชั้นสัดแตกต่างกันคือ (a) 0.064 และ (b) 0.190 phr (II) กราฟการกระจายตัวของขนาดของเซลล์ และ (III) กราฟการกระจายตัวของขนาดของรูพรุน

จากรูปที่ 4.18 โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดที่ปริมาณน้ำมันชั้นสัดแตกต่างกัน พบว่า โฟมยางที่ผสมน้ำมันชั้นสัดปริมาณ 0.064 phr มีขนาดของเซลล์ตั้งแต่ 150 – 550 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยของเซลล์อยู่ที่ 297.34 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.18 (a-II) มีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 25 – 175 ไมโครเมตร และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 85.98 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.18 (a-III) ส่วนที่โฟมยางที่ผสมน้ำมันชั้นสัดปริมาณ 0.190 phr มีขนาดของเซลล์ตั้งแต่ 50 – 450 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยของเซลล์อยู่ที่ 239.80 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.18 (b-II) มีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 40 – 150 ไมโครเมตร และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 73.97 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.18 (c-III) และที่โฟมยางที่ผสมน้ำมันชั้นสัดปริมาณ 0.320 phr ไม่สามารถวัดขนาดของเซลล์และรูพรุนได้ เนื่องจากขาดความสม่ำเสมอของเซลล์

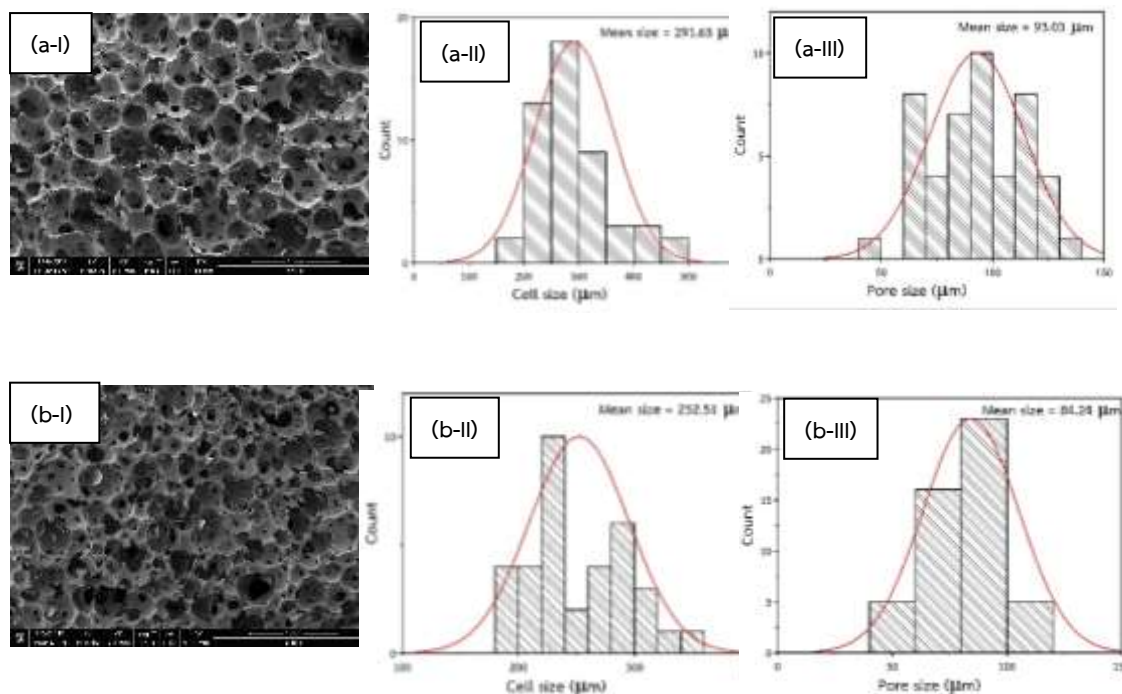
#### 4.3.4.3 สันฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดที่ปริมาณ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr



**รูปที่ 4.19** ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่ใช้ปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ต่างกันคือ (a) 0.014 และ (b) 0.028 phr ด้วยกำลังขยาย (I) 100x (II) 300x และ (III) 500x

จากรูปที่ 4.19 ผลการศึกษาลักษณะสันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) ของโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดปริมาณ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr พบว่า โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.014 phr มีลักษณะเป็นเซลล์ลักษณะคล้ายทรงกลมเชื่อมต่อนี้กัน และมีรูพรุนรูปร่างคล้ายทรงกลมอยู่ภายใน ดังรูปที่ 4.19 (b-II) เมื่อปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเพิ่มขึ้นทำให้โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.028 phr มีการเชื่อมต่อกันของเซลล์ที่น้อยลง และเซลล์มีลักษณะบิดเบี้ยวมากขึ้นดังรูปที่ 4.19 (b-I)

เมื่อใช้โปรแกรม Image - J เพื่อทำการหาการกระจายตัวของขนาดของเซลล์และรูพรุนของ โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่ปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.20



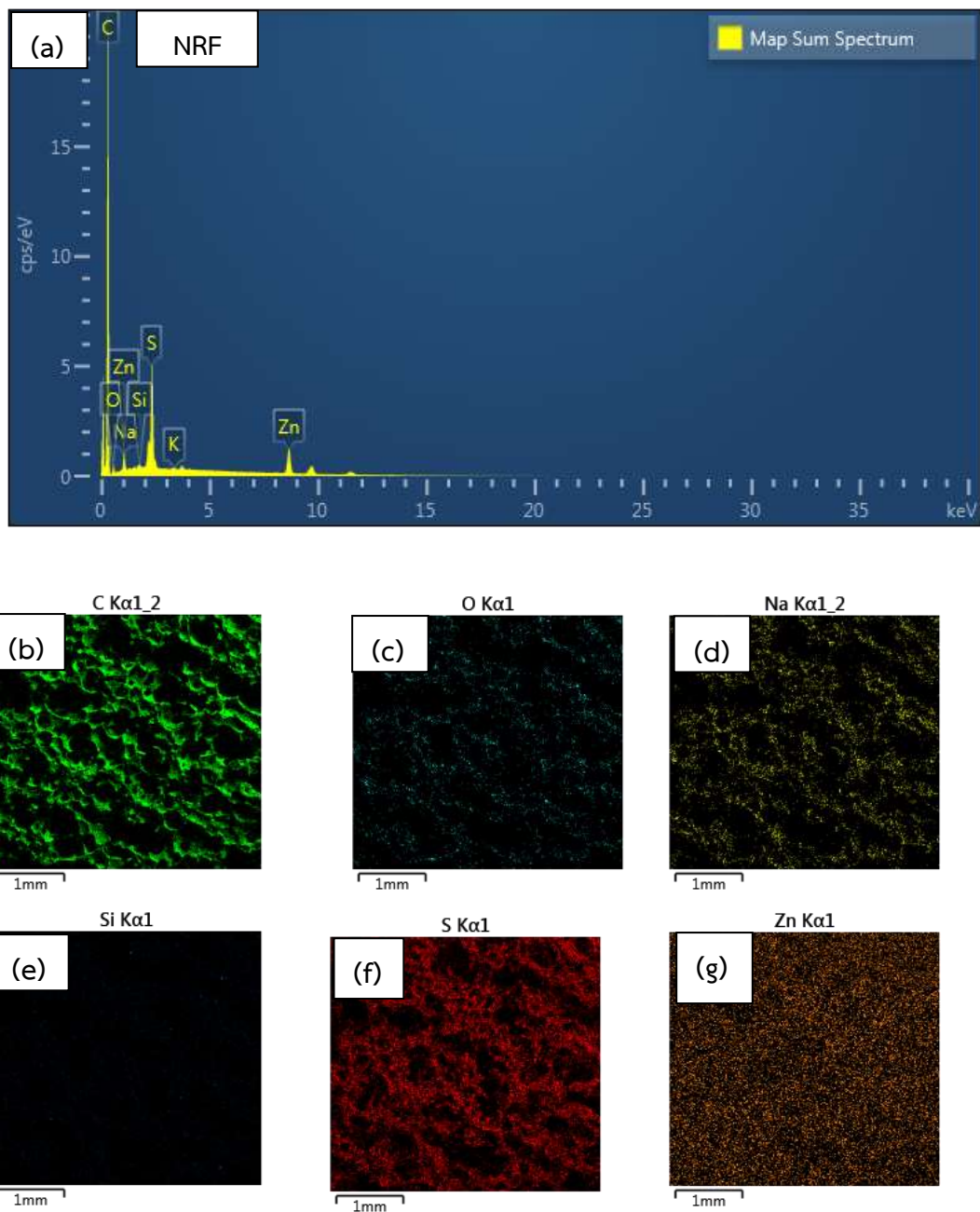
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ใช้ปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนแตกต่างกันคือ (a) 0.014 และ (b) 0.028 phr (II) กราฟการกระจายตัวของขนาดของเซลล์ และ (III) กราฟการกระจายตัวของขนาดของรูพรุน

จากรูปที่ 4.20 โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดที่ปริมาณ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 0.014 phr พบว่ามีขนาดของเซลล์ตั้งแต่ 150 – 500 ไมโครเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ยของเซลล์อยู่ที่ 291.63 ไมโครเมตร มีขนาดของรูพรุนตั้งแต่ 40 – 140 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนอยู่ที่ 93.03 ไมโครเมตร ส่วนโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.028 phr พบว่ามีขนาดของเซลล์ตั้งแต่ 180 – 300 ไมโครเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ยของเซลล์อยู่ที่ 252.51 ไมโครเมตร มีขนาดของรูพรุนตั้งแต่ 45 – 120 ไมโครเมตร ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนอยู่ที่ 84.24 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.3

จะเห็นได้ว่าการเติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดนั้นจะทำให้ขนาดของเซลล์และรูพรุนใหญ่ขึ้น เนื่องจากสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนไปทำลายโครงสร้างของโฟมยางธรรมชาติในบางส่วน ทำให้เซลล์และรูพรุนของโฟมยางธรรมชาติที่มีการเติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีขนาดใหญ่ขึ้น [83]



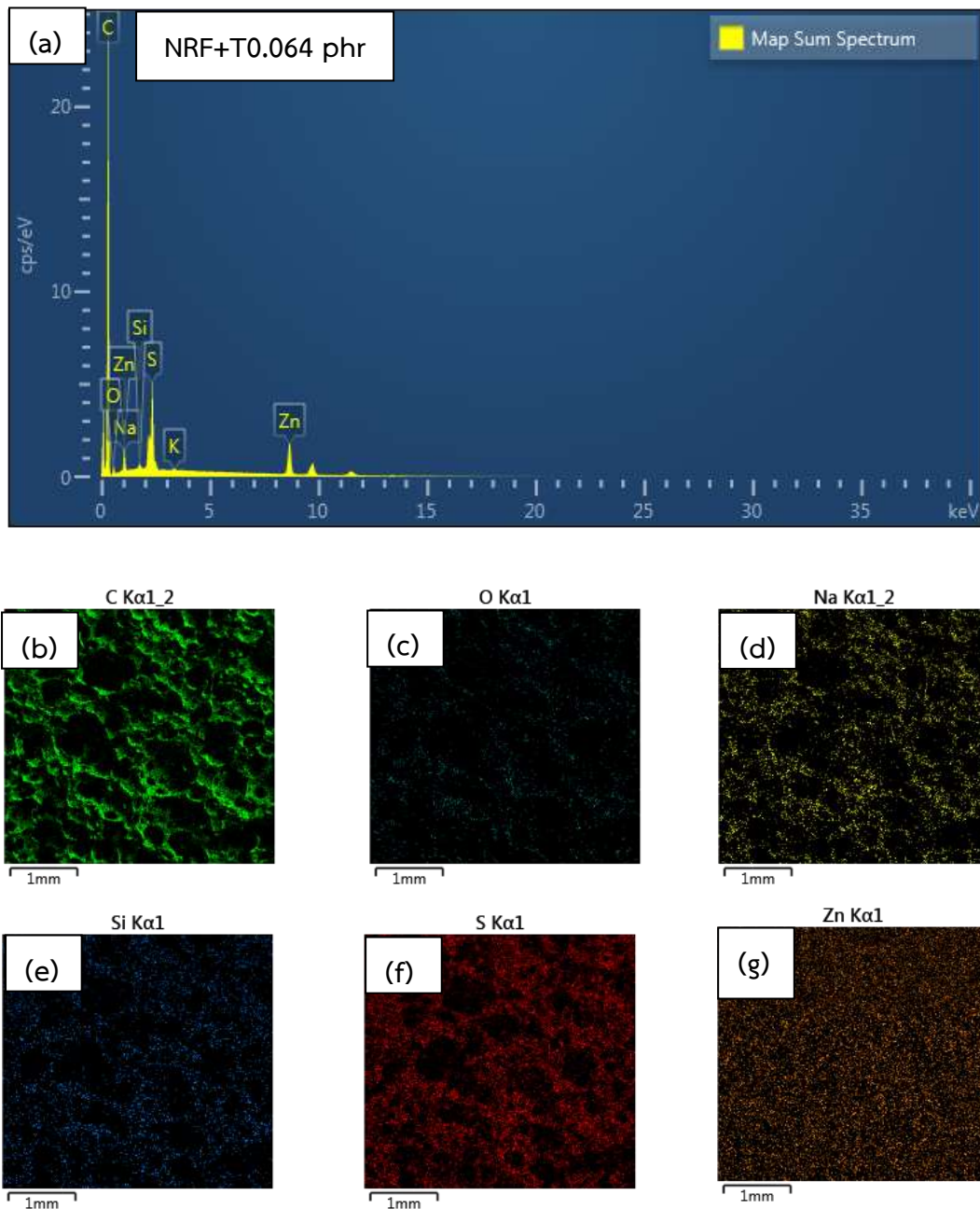
## 4.3.5.1 โฟมยางธรรมชาติ



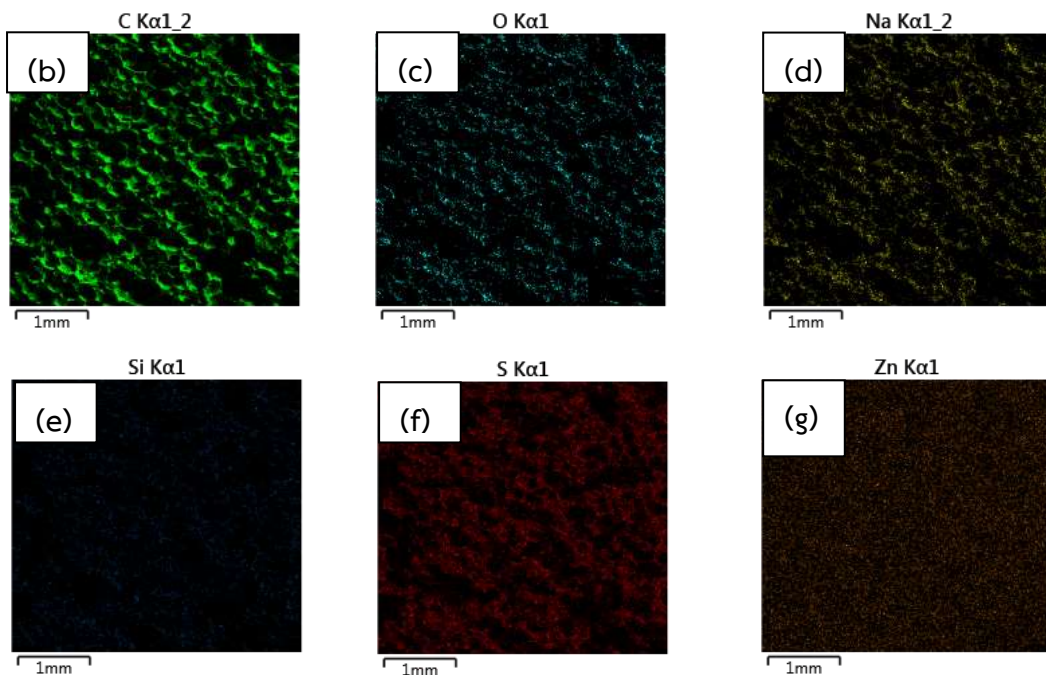
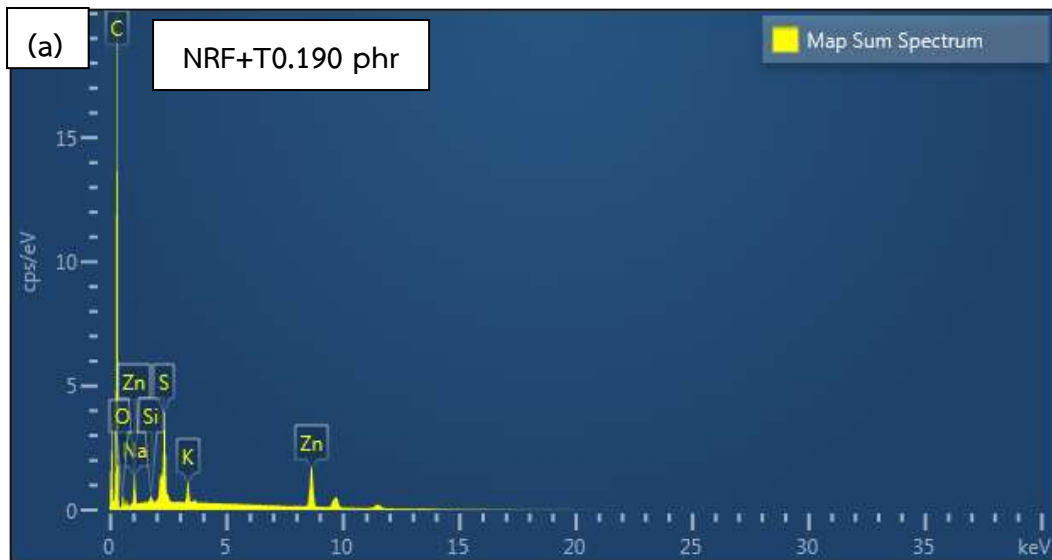
รูปที่ 4.21 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโฟมยางธรรมชาติ และ (b) – (g) แผนที่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และซิงค์ (Zn) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.21 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโฟมยางธรรมชาติ พบธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่างทั้งหมด 7 ธาตุคือ คาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไอโซพรีนในยางธรรมชาติ ส่วนออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) โพแทสเซียม และซิงค์ (Zn) มาจากสารเคมีและสารตัวเร่งที่ใช้ในกระบวนการเตรียมโฟมยางธรรมชาติ

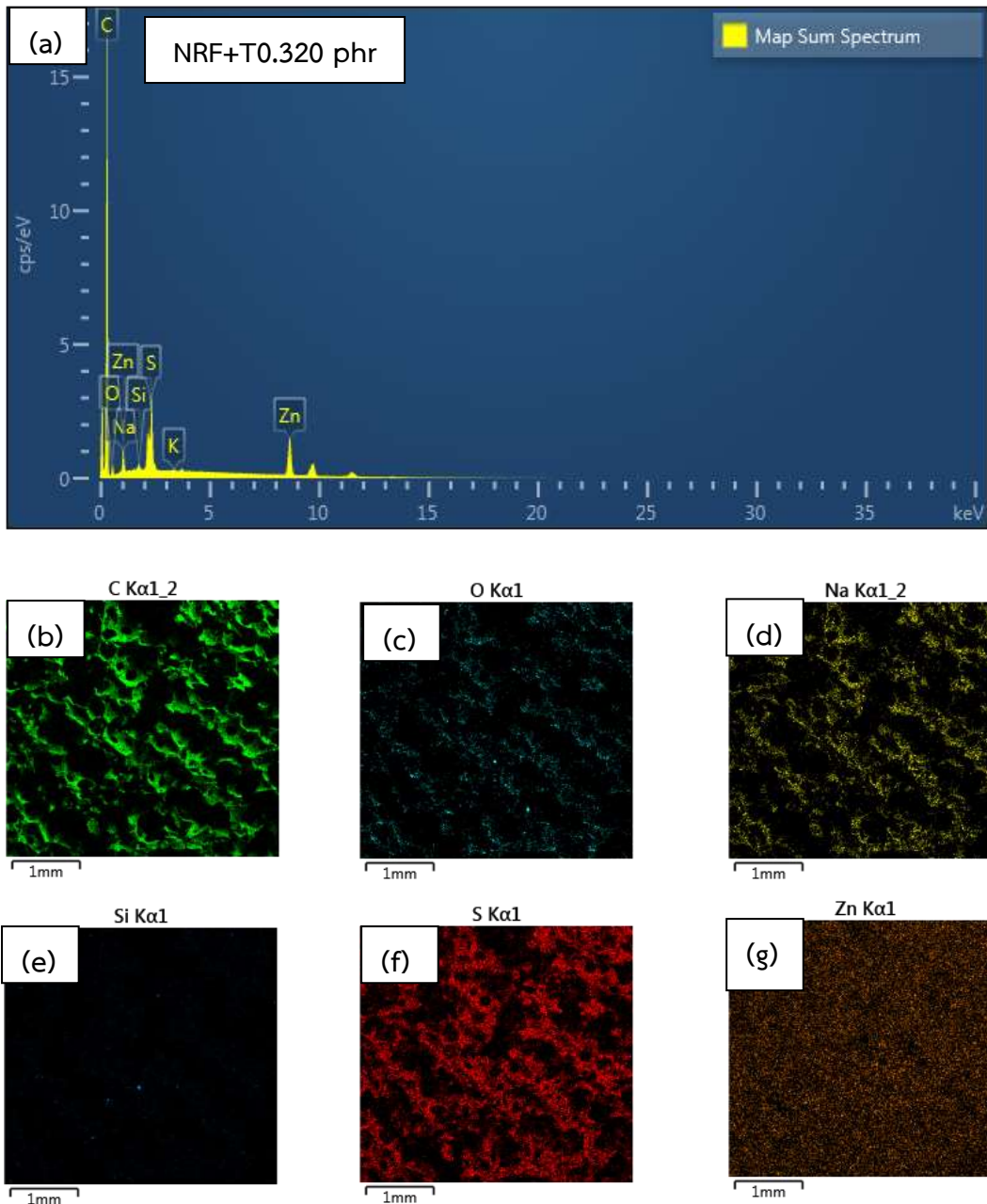
## 4.3.5.2 โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำขมชั้นสด 0.064 0.190 และ 0.320 phr



รูปที่ 4.22 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำขมชั้นสด 0.064 phr และ (b) – (g) แผนที่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และซิงค์ (Zn) ตามลำดับ



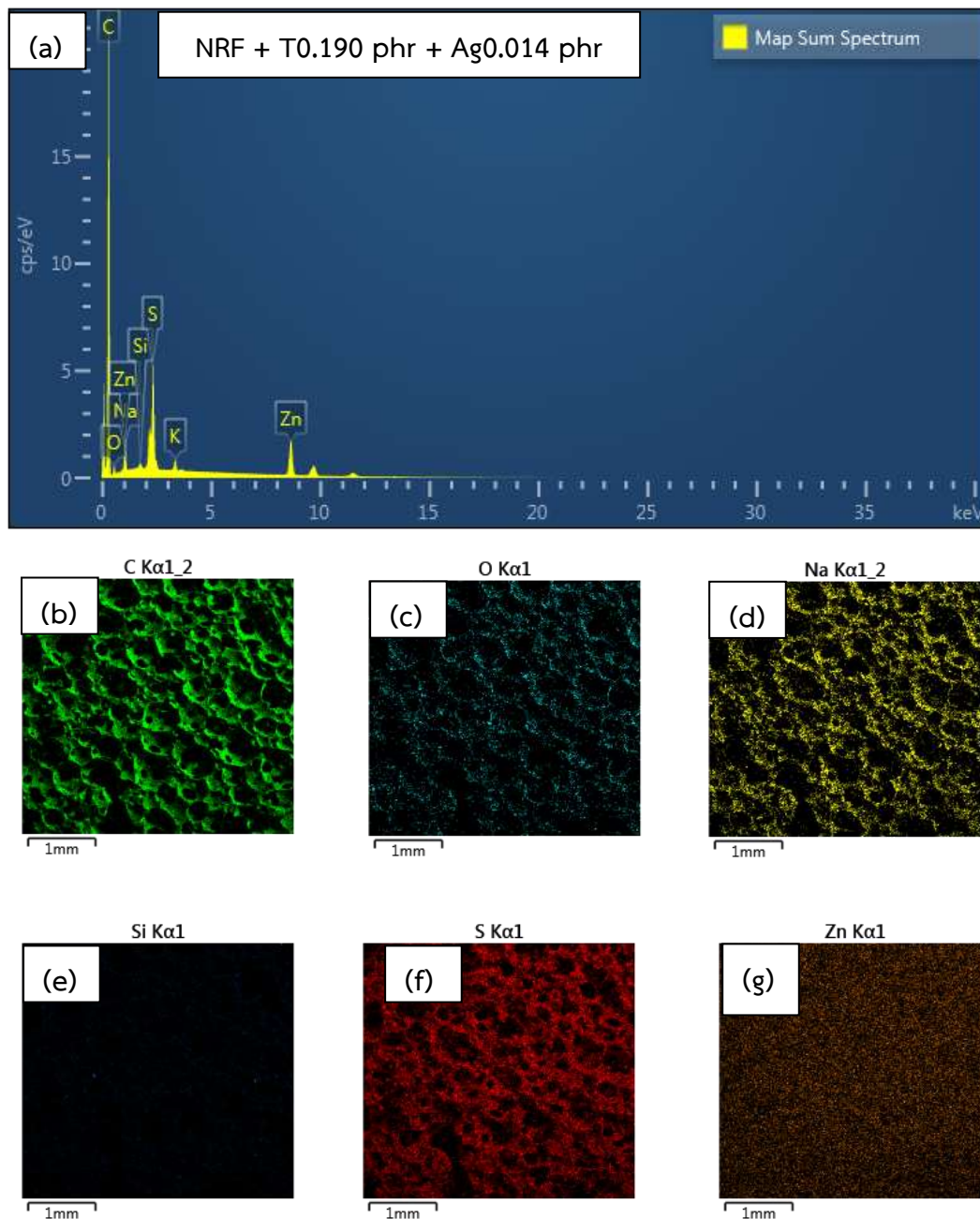
รูปที่ 4.23 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุไนโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสด 0.190 phr และ (b) – (g) แผนที่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และซิงค์ (Zn) ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสด 0.320 phr และ (b) – (g) แผนที่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และซิงค์ (Zn) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.22 – 4.24 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสดที่ ปริมาณ 0.064, 0.190 และ 0.320 phr ตามลำดับ พบธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่าง ทั้งหมด 7 ธาตุคือ คาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไอโซพรีนในยางธรรมชาติ และจากเคอร์คูมินที่อยู่ในน้ำขี้ผึ้ง ส่วนออกซิเจน (O) มาจากเคอร์คูมินที่อยู่ในน้ำขี้ผึ้ง และจากสารเคมี สารตัวเร่ง ในกระบวนการเตรียมโพลีเอทิลีนธรรมชาติ ส่วนโซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) โพแทสเซียม และซิงค์ (Zn) มาจากสารเคมีและสารตัวเร่งที่ใช้ในกระบวนการเตรียมโพลีเอทิลีนธรรมชาติ

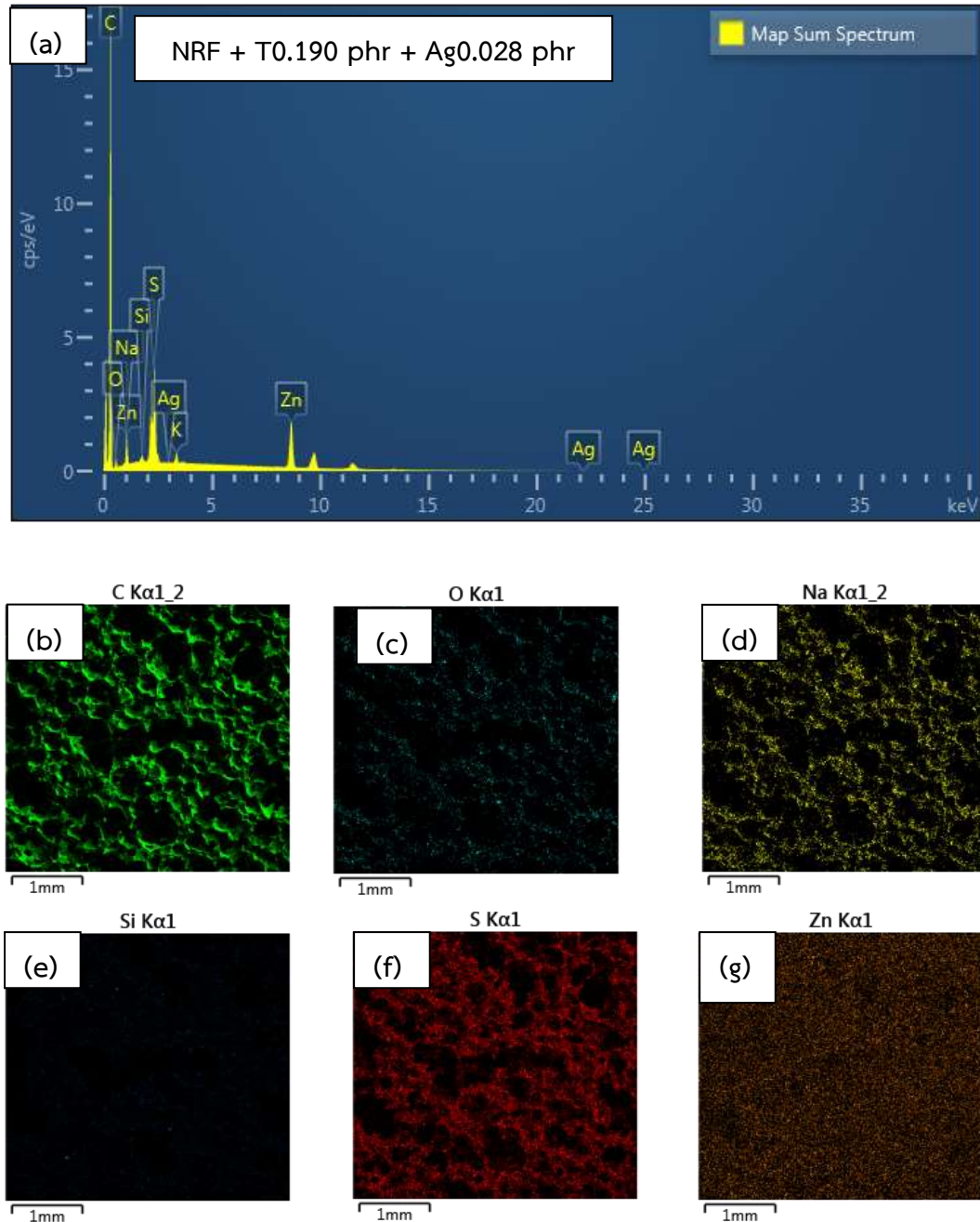
4.3.5.3 โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.014 และ 0.028 phr



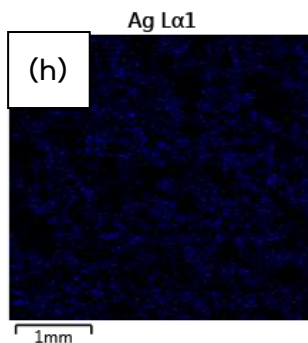
รูปที่ 4.25 (a) EDS สเปกตรัม และองค์ประกอบของธาตุในโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.014 phr และ (b) – (g) แผนที่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และซิงค์ (Zn) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.25 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.014 phr พบธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่างทั้งหมด 7 ธาตุคือ คาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไอโซพรีนในยางธรรมชาติ และจากเคอร์คูมินที่อยู่น้ำมันชั้น ส่วนออกซิเจน (O) มาจากเคอร์คูมินที่อยู่น้ำมันชั้น และจากสารเคมี สารตัวเร่งในกระบวนการเตรียมโฟมยาง

ธรรมชาติ ส่วนโซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S), โพแทสเซียม และซิงค์ (Zn) มาจากสารเคมี และสารตัวเร่งที่ใช้ในกระบวนการเตรียมโพลิเมอร์ธรรมชาติ แต่ซิลเวอร์ (Ag) ไม่สามารถตรวจพบได้ เนื่องจากมีปริมาณน้อย



รูปที่ 4.26 (a) EDS spectrum และองค์ประกอบของธาตุในโพลิเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณ 0.028 phr และ (b) – (g) แผนที่การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) และซิงค์ (Zn) ตามลำดับ (มีต่อ)



รูปที่ 4.26 (ต่อ) (h) แผนที่การกระจายตัวของธาตุซิลเวอร์ (Ag)

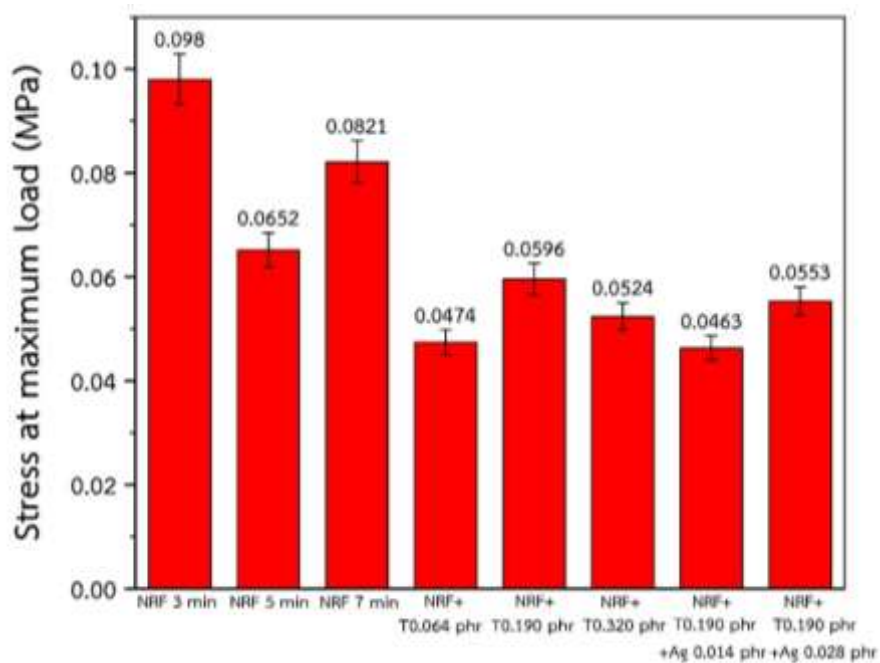
จากรูปที่ 4.26 แสดงสเปกตรัมของธาตุในโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.028 phr พบธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่างทั้งหมด 7 ธาตุคือ คาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไฮโดรคาร์บอนในโพลีเอทิลีน และจากเคอร์คูมินที่อยู่ชั้นน้ำมันชั้น ส่วนออกซิเจน (O) มาจากเคอร์คูมินที่อยู่ชั้นน้ำมันชั้น และจากสารเคมี สารตัวเร่งในกระบวนการเตรียมโพลีเอทิลีน ส่วนโซเดียม (Na), ซิลิกอน (Si), ซัลเฟอร์ (S), โพแทสเซียม และซิงค์ (Zn) มาจากสารเคมี และสารตัวเร่งที่ใช้ในกระบวนการเตรียมโพลีเอทิลีน นอกจากนั้นยังพบซิลเวอร์ (Ag) ในปริมาณร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนัก

#### 4.4 สมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีนผสม

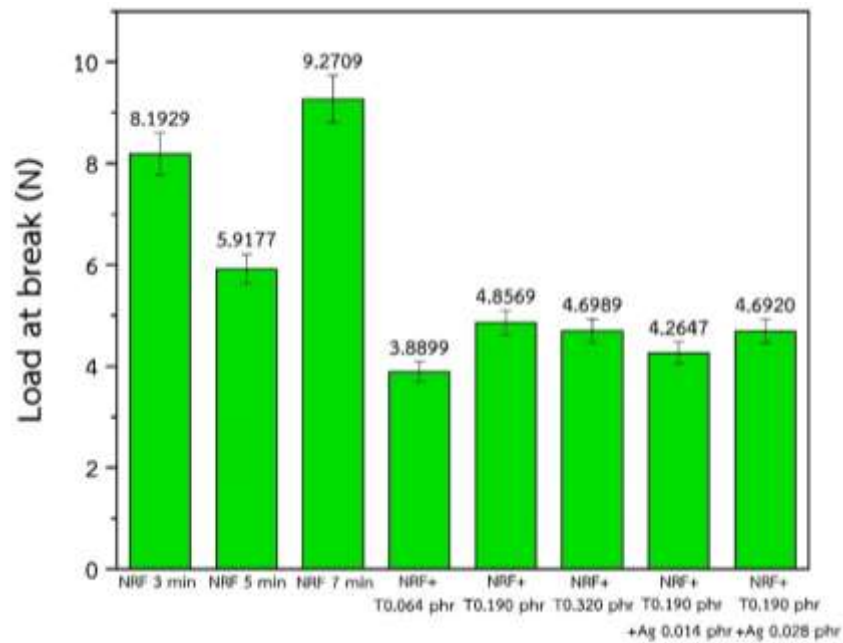
การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีนผสมโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสัด และโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ NRF 3 min NRF 5 min NRF 7min NRF+T0.064 phr NRF+T0.190 phr NRF + T0.320 phr NRF + T0.190 phr + Ag0.014 phr และ NRF+T0.190 phr + Ag0.028 phr ซึ่งค่าสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาคือ ค่าความเค้นสูงสุด (Stress at maximum load), ค่าการคงรูป (Stiffness), ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus), ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) โดยผลการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งแรงดึงและแรงกดอัด แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ค่าการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสตัค และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสตัคกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

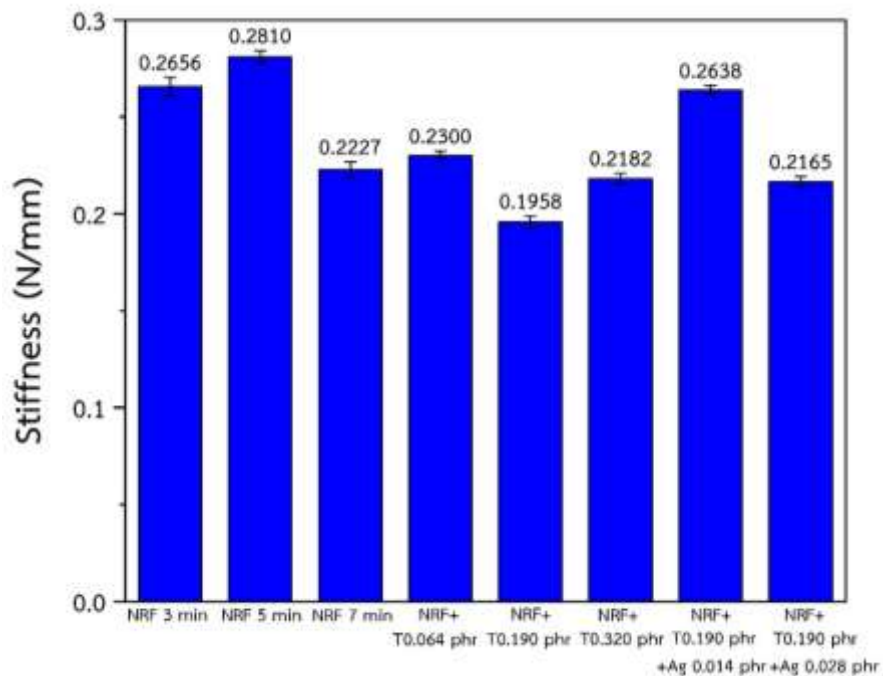
ตัวอย่าง	Stress at maximum load (MPa)	Load at break (N)	Stiffness (N/mm)	Young's modulus (MPa)
NRF 3 min	0.0980	8.1929	0.2656	0.0930
NRF 5 min	0.0652	5.9177	0.2810	0.0983
NRF 7 min	0.0821	9.2709	0.2227	0.0779
NRF+T0.064 phr	0.0474	3.8899	0.2300	0.0805
NRF+T0.190 phr	0.0596	4.8569	0.1958	0.0685
NRF+T0.320 phr	0.0524	4.6989	0.2182	0.0764
NRF+T0.190 phr +Ag0.014 phr	0.0463	4.2647	0.2638	0.0923
NRF+T0.190 phr +Ag0.028 phr	0.0553	4.6920	0.2165	0.0758



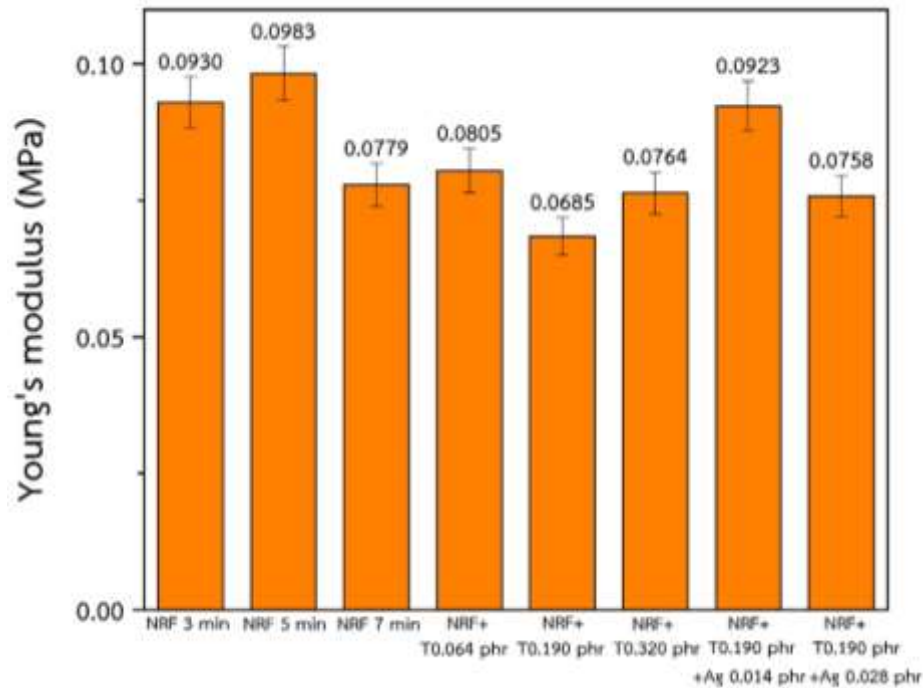
รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบ Stress at maximum load จากการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสตัค และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสตัคกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน



รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบ Load at break จากการต้านทานแรงดึงของโฟมยางธรรมชาติ โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสด และโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน



รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบ Stiffness จากการต้านทานแรงดึงของโฟมยางธรรมชาติ โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสด และโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน



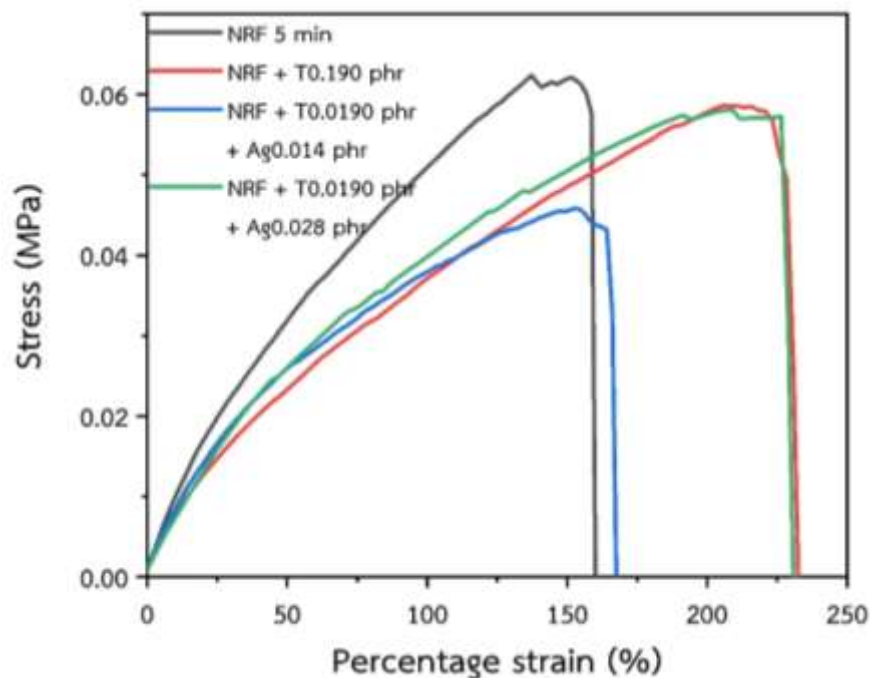
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบ Young's modulus จากการต้านทานแรงดึงของโพลีเอพอกซีเรซินธรรมดา โพลีเอพอกซีเรซินผสมน้ำมันชันสด และโพลีเอพอกซีเรซินผสมน้ำมันชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.27 – 4.31 แสดงผลของเวลาในการตีฟองขึ้นรูปโพลีเอพอกซีเรซินที่ต่างกันคือ 3, 5 และ 7 นาที พบว่าที่เวลาการตีฟอง 5 นาที จะมีค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) ต่ำที่สุด แต่จะมีค่าการคงรูป (Stiffness) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอพอกซีเรซินที่ใช้เวลาในการตีฟองที่ต่างกัน (3 และ 7 นาที) เนื่องจากเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สามารถทำให้ฟองที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กที่สุดและมีโครงสร้างของรูพรุนที่เกิดขึ้นสมบูรณ์ที่สุด ซึ่งสองค่านี้เป็นค่าที่สำคัญที่บ่งบอกถึงความสามารถในการคงรูปของโพลีเอพอกซีเรซิน ทั้งนี้เป็นเพราะที่เวลาในการตีฟอง 5 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ขนาดเฉลี่ยของเซลล์เล็กที่สุดดังที่ได้อธิบายไปข้างต้นในตารางที่ 4.3

ส่วนโพลีเอพอกซีเรซินผสมน้ำมันชันสดในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.064 0.190 และ 0.320 phr พบว่า การเติมน้ำมันชันลงไปในตัวโพลีเอพอกซีเรซินนั้นจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงของโพลีเอพอกซีเรซินผสมน้ำมันชันสด ทั้งค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load) ลดลงจาก 0.0652 MPa เป็น 0.0474 0.0596 และ 0.0524 MPa ตามลำดับ ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) ลดลงจาก 5.9177 N เป็น 3.8899 4.8569 และ 4.6989 N ตามลำดับ ค่าการคงรูป (Stiffness) ลดลงจาก 0.2810 N/mm เป็น 0.2300, 0.1958 และ 0.2182 N/mm ตามลำดับ และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ลดลงจาก 0.0983 MPa เป็น 0.0805 0.0685 และ 0.0764 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอพอกซีเรซินที่ใช้เวลาในการตีฟอง 5 นาที เนื่องจากน้ำมันชัน

ไม่ได้มีคุณสมบัติในการเสริมความแข็งแรงให้กับโพลีเอทิลีนธรรมชาติ แต่น้ำไขมันชั้นที่เติมลงไปนั้นจะไปทำให้พองยางที่เกิดขึ้นนั้นยุบตัวลง ส่งผลทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงทั้งหมดนั้นลดลง

ส่วนโพลีเอทิลีนธรรมชาติที่ผสมน้ำไขมันชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 พบว่าค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load) ลดลงจาก 0.0596 MPa เป็น 0.0463 และ 0.0553 MPa ตามลำดับ ค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) ลดลงจาก 4.8569 N เป็น 4.2647 และ 4.6920 N ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมน้ำไขมันชั้นสด 0.190 phr ส่วนค่าการคงรูป (Stiffness) เพิ่มขึ้นจาก 0.1958 N/mm เป็น 0.2638 และ 0.2165 N/mm และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นจาก 0.0685 MPa เป็น 0.0923 และ 0.0758 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมน้ำไขมันชั้นสด 0.190 phr นั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปโพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมน้ำไขมันชั้นสดนั้นอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะไปทำลายโครงสร้างของยางบางส่วน [83] ทำให้ยางจับตัวกันเป็นก้อนในบางส่วน ส่งผลให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุดและค่าแรงดึงที่จุดขาดลดลง แต่จะช่วยเพิ่มค่าการคงรูป และค่ามอดูลัสของยังได้

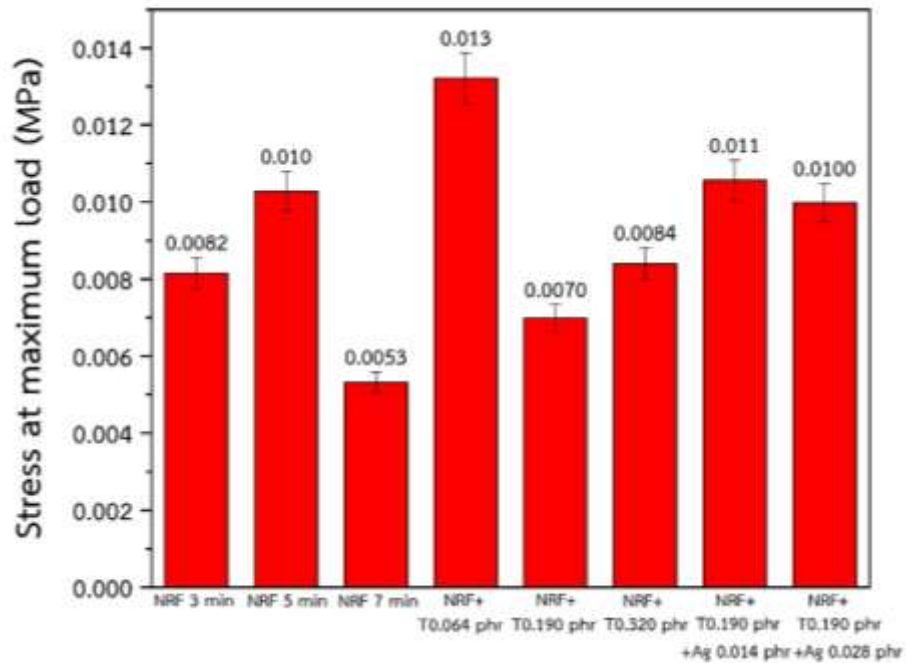


รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบ Tensile testing จากการต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีนธรรมชาติ โพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมน้ำไขมันชั้นสด และโพลีเอทิลีนธรรมชาติผสมน้ำไขมันชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr

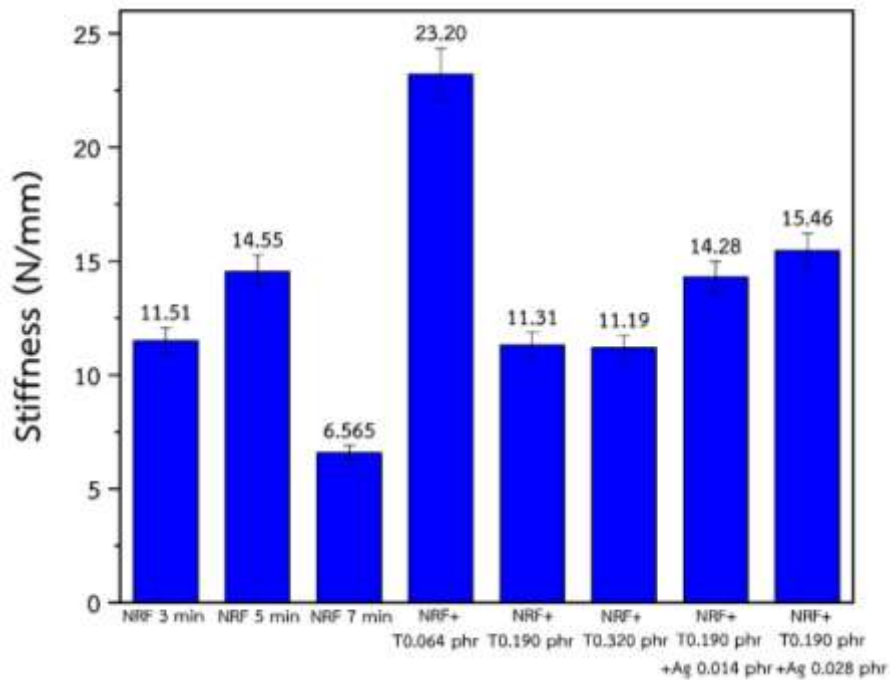
จากรูปที่ 4.31 เมื่อนำโพลียเอทิลีน ฟิล์มโพลียเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสด และโพลียเอทิลีน ฟิล์มโพลียเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ ไปทำการทดสอบการต้านทานแรงดึงพบว่า การเติมเติมน้ำมันชั้นสดลงในโพลียเอทิลีนจะช่วยทำให้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสูงขึ้น เมื่อเติมอนุภาคซิลเวอร์ลงไปปริมาณ 0.014 phr จะทำให้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็น 0.028 phr จะทำให้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสูงขึ้นเทียบเท่ากับเส้นโค้งของโพลียเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสด เนื่องจากการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในโพลียเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสดนั้น อนุภาคซิลเวอร์นาโนจะไปทำลายโครงสร้างของยางบางส่วน ทำให้ยางจับตัวกันเป็นก้อนในบางส่วน เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจึงลดลง

**ตารางที่ 4.5** ค่าการต้านทานแรงกดของโพลียเอทิลีน ฟิล์มโพลียเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสด และโพลียเอทิลีน ฟิล์มโพลียเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

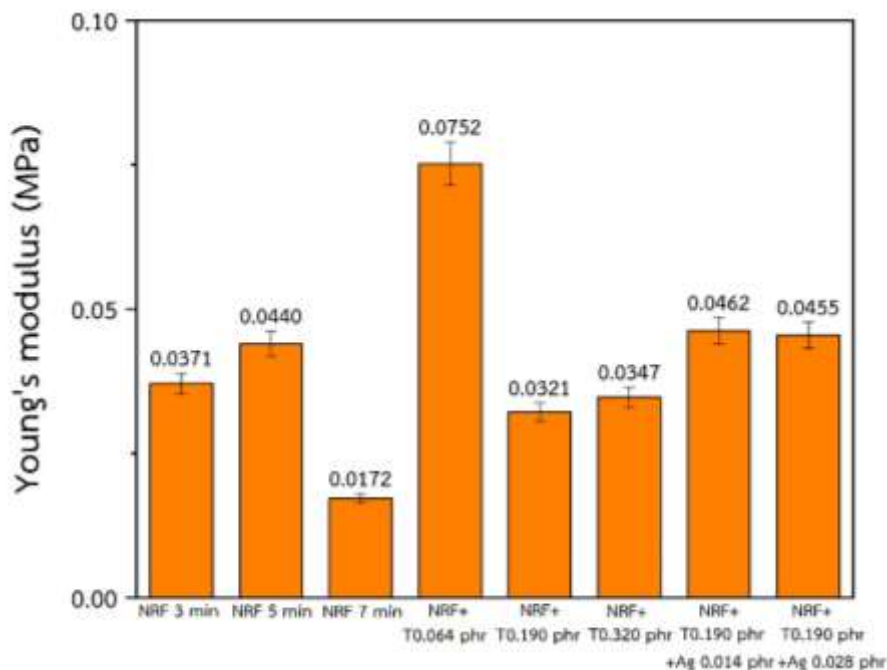
ตัวอย่าง	Stress at maximum load (MPa)	Stiffness (N/mm)	Young's modulus (MPa)
NRF 3 min	0.0082	11.5103	0.0371
NRF 5 min	0.0103	14.5463	0.0440
NRF 7 min	0.0053	6.5646	0.0172
NRF+T0.064 phr	0.0132	23.2043	0.0752
NRF+T0.190 phr	0.0070	11.3058	0.0321
NRF+T0.320 phr	0.0084	11.1888	0.0347
NRF+T0.190 phr +Ag0.014 phr	0.0106	14.2846	0.0462
NRF+T0.190 phr +Ag0.028 phr	0.0100	15.4589	0.0455



รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบ Stress at maximum จากการต้านทานแรงกดของโพลียเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ โพลียเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ผสมน้ำมันชันสด และโพลียเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ผสมน้ำมันชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน



รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบ Stiffness จากการต้านทานแรงกดของโพลียเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ โพลียเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ผสมน้ำมันชันสด และโพลียเอทิลีน เทราฟลูออไรด์ผสมน้ำมันชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน



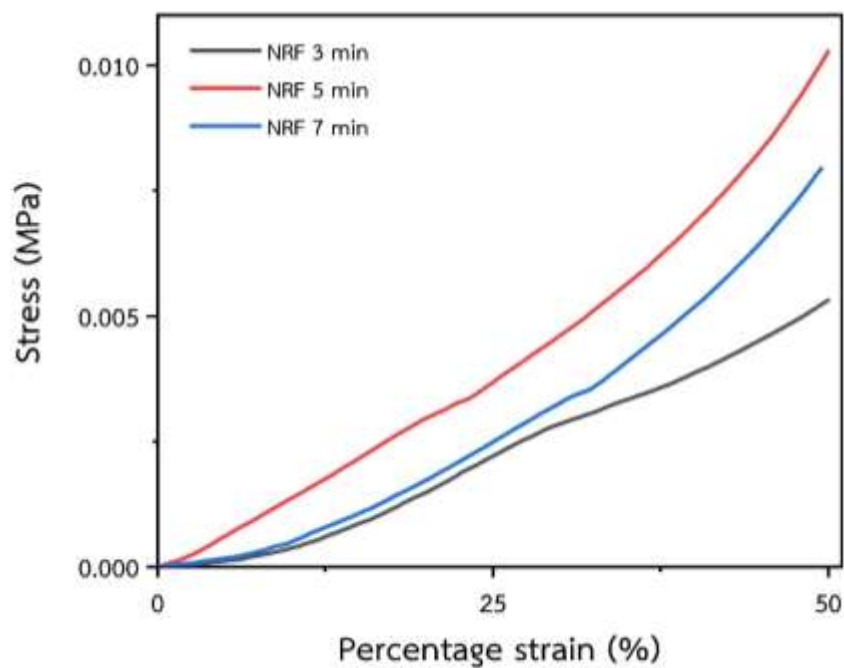
**รูปที่ 4.34** กราฟเปรียบเทียบ Young's modulus จากการต้านทานแรงกดของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัด และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.32 – 4.34 ผลของเวลาในการตีฟองขึ้นรูปโพลีเมอร์ธรรมชาติที่แตกต่างกันคือ 3 5 และ 7 นาที พบว่าที่เวลาการตีฟอง 5 นาที จะมีค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load) ค่าการคงรูป (Stiffness) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟองที่แตกต่างกัน (3 และ 7 นาที) จึงบ่งบอกได้ว่าการตีฟองด้วยเวลา 5 นาทีนั้นจะได้โพลีเมอร์ธรรมชาติที่มีความหนาแน่น และความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยของเซลล์ที่เล็กที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่เวลาการตีฟอง 3 และ 7 นาที

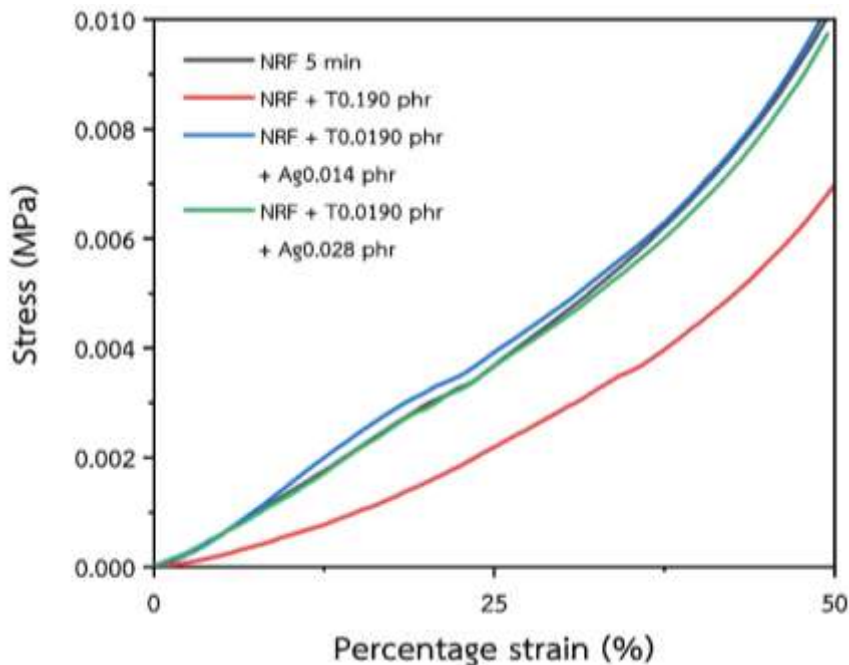
ส่วนโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 0.064, 0.190 และ 0.320 phr พบว่า การเติมน้ำมันชั้นสัดลงในน้ำโพลีเมอร์ธรรมชาติปริมาณ 0.064 phr นั้นทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด ค่าการคงรูป และค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ธรรมชาติ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันชั้นสัดเป็น 0.190 และ 0.320 phr พบว่าค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด ค่าการคงรูป และค่ามอดูลัสของยังลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ธรรมชาติ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัด 0.064 phr เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันชั้นสัด เป็นการเพิ่มของเหลวที่ทำให้ฟองยุบตัวลง ส่งผลทำให้ค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด ค่าการคงรูป และค่ามอดูลัสของยังลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันชั้นสัดในโพลีเมอร์ธรรมชาติ

ส่วนโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ผสมน้ำมันชั้นสัดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 พบว่าค่าความเค้นเมื่อให้แรงสูงสุด (Stress at maximum load)

ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าการคงรูป (Stiffness) ลดลงจาก 14.5463 N/mm เป็น 14.2846 N/mm แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็น 0.028 phr ได้ค่าการคงรูปเพิ่มเป็น 15.4589 N/mm และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นจาก 0.0440 MPa เป็น 0.0462 และ 0.0455 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมยางธรรมชาติผสมขี้ผึ้งชั้นสด 0.190 phr นั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำขี้ผึ้งชั้นสดนั้นอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะไปทำลายโครงสร้างของยางบางส่วน [83] ทำให้ยางจับตัวกันเป็นก้อนในบางส่วน จึงช่วยเพิ่มค่าการคงรูป และค่ามอดูลัสของยังได้



รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบแรงกด (Compression test) ของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟองแตกต่างกันคือ 3 5 และ 7 นาที



**รูปที่ 4.36** กราฟเปรียบเทียบการทดสอบแรงกด (Compression test) ของโฟมยางธรรมชาติ โฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสด และโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr

จากรูปที่ 4.35 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในการต้านทานแรงกดของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้เวลาตีฟองแตกต่างกันคือ 3 และ 7 นาที พบว่าโฟมยางธรรมชาติที่ใช้เวลาการตีฟอง 5 นาที มีเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่สูงที่สุด เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยของเซลล์เล็กที่สุดดังตารางที่ 4.3 จึงทำให้โฟมยางธรรมชาติที่ใช้เวลาการตีฟอง 5 นาที มีความหนาแน่นมากที่สุด [82] ทำให้สามารถทนต่อแรงกดอัดได้มากที่สุด รองลงมาเป็นเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้เวลาในการตีฟอง 7 และ 3 นาที ตามลำดับ เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยของเซลล์เล็กรองลงมาตามลำดับ

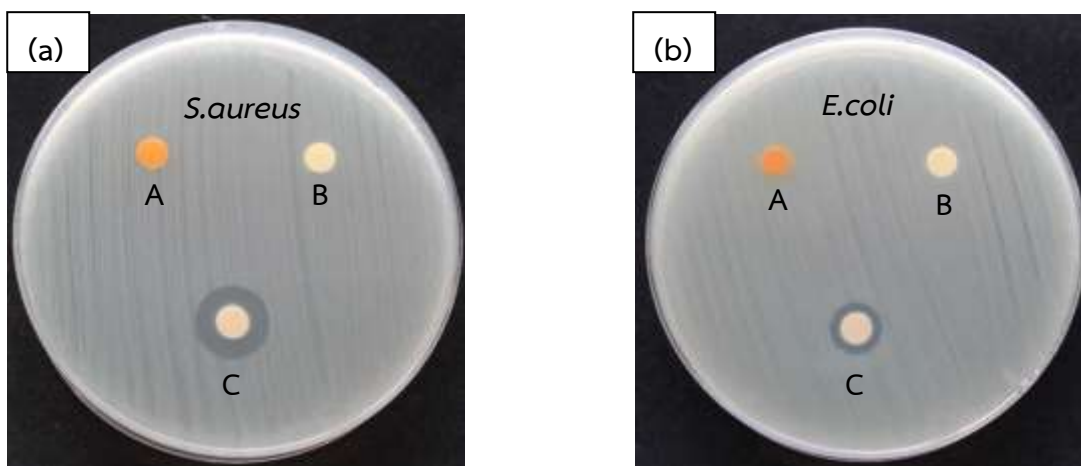
จากรูปที่ 4.36 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในการต้านทานแรงกดของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติที่ใช้ปริมาณน้ำมันชันสดแตกต่างกันคือ 0.064 0.190 และ 0.320 phr พบว่าการเติมน้ำมันชันสดปริมาณ 0.190 phr ทำให้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมยางธรรมชาติ เนื่องจากการเติมน้ำมันชันลงไปโฟมยางธรรมชาติในปริมาณ 0.190 phr นั้นทำให้ขนาดเฉลี่ยของเซลล์ลดลง แต่ก็ทำให้ฟองยางที่เกิดขึ้นเกิดการยุบตัวลง จึงส่งผลทำให้โฟมยางธรรมชาติผสมนี้มีความหนาแน่นลดลง เมื่อทำการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสด 0.190 phr ในปริมาณที่อนุภาคซิลเวอร์นาโนแตกต่างกันคือ 0.014 และ 0.028 phr พบว่าเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมยางธรรมชาติผสมน้ำมันชันสด 0.190 phr และไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมยางธรรมชาติ เนื่องจากการเติมอนุภาค

ซิลเวอร์นาโนลงไปในนั้น โมเลกุลของไอโซพรีนในน้ำยารักษาจะถูกทำลาย [83] และทำให้จับตัวกันเป็นก้อนในบางส่วน จึงเพิ่มความแข็งให้กับโพลีเอทิลีนได้ ส่งผลให้เกิดการต้านทานแรงกดอัดได้สูงขึ้น

#### 4.5 สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอทิลีน และโพลีเอทิลีนผสม

การศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสดี และโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสดีกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ NRF 3 min NRF 5 min NRF 7min NRF+T0.064 phr NRF+T0.190 phr NRF+T0.320 phr NRF+T0.190 phr +Ag0.014 phr และ NRF+T0.190 phr +Ag0.028 phr โดยใช้แบคทีเรียแกรมบวกคือ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 และแบคทีเรียแกรมลบคือ *Escherichia coli* ATCC 25922 ในการทดสอบด้วยวิธีการ Agar disc diffusion โดยมีแบคทีเรียทั้งหมด  $1 \times 10^8$  cfu/g (colony forming unit) ซึ่งผลการทดสอบทำได้โดยการวัดรัศมีของโซนยับยั้ง (inhibition zone) ในหน่วยมิลลิเมตร

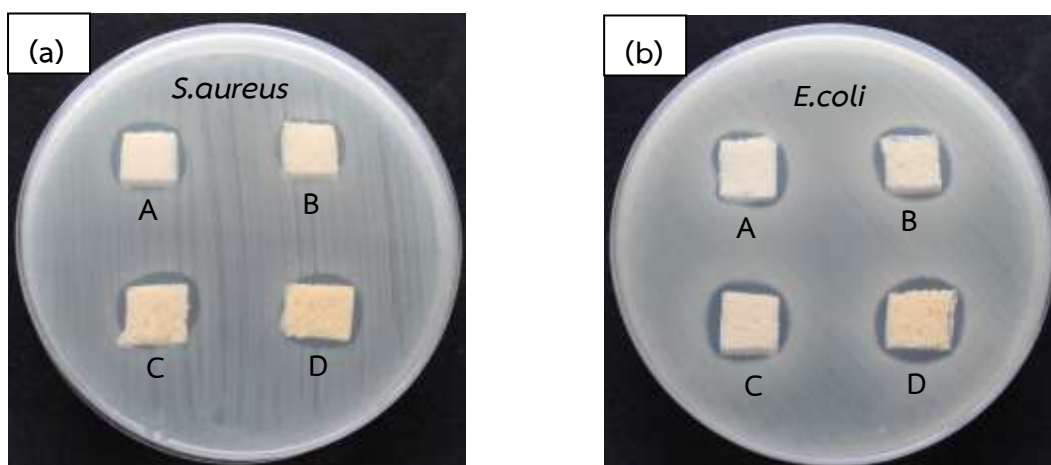
##### 4.5.1 การศึกษาผลของน้ำมันชั้นสดี น้ำมันชั้น และสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้ ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย



รูปที่ 4.37 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) *S.aureus* และ (b) *E.coli* ของ (A) น้ำมันชั้นสดี (B) น้ำมันชั้น และ (C) สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้

จากรูปที่ 4.37 (a) และ (b) การศึกษาผลของน้ำมันชั้นสด น้ำมัน และสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้ พบว่า (A) และ (B) น้ำมันชั้นสดและขม้นสำหรับการใช้เตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน ตามลำดับ ไม่เกิดการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิด เนื่องจากความเข้มข้นมีไม่มากพอ และ (C) สารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้ เกิดการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง *S.aureus* และ *E.coli* ได้ 14.0 และ 10.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ได้ดีกว่า *E.coli* เนื่องจากแบคทีเรีย *S.aureus* มีผนังเซลล์เพียง 1 ชั้น แต่แบคทีเรีย *E.coli* นั้นมีผนังเซลล์ 2 ชั้น [42,50,77]

#### 4.5.2 การศึกษาผลของปริมาณน้ำมันชั้นสดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมษธรรมชาติผสม



รูปที่ 4.38 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) *S.aureus* และ (b) *E.coli* ของ (A) โพลีเมษธรรมชาติ (B) โพลีเมษธรรมชาติผสมน้ำมันชั้น 0.064 phr (C) โพลีเมษธรรมชาติผสมน้ำมันชั้น 0.190 phr และ (D) โพลีเมษธรรมชาติผสมน้ำมันชั้น 0.320 phr

จากรูปที่ 4.48 (a) และ (b) การศึกษาผลของปริมาณน้ำมันชั้นสดที่เติมลงในโพลีเมษธรรมชาติ พบว่า (A) โพลีเมษธรรมชาติสามารถเกิดโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง *S.aureus* และ *E.coli* ได้ 14.1 และ 14.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากสารตัวเร่ง เช่น ZDEC ZMBT Sulpher และ ZnO ที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมโพลีเมษธรรมชาติ สารเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ จึงทำให้เกิดโซนยับยั้งขึ้น [55]

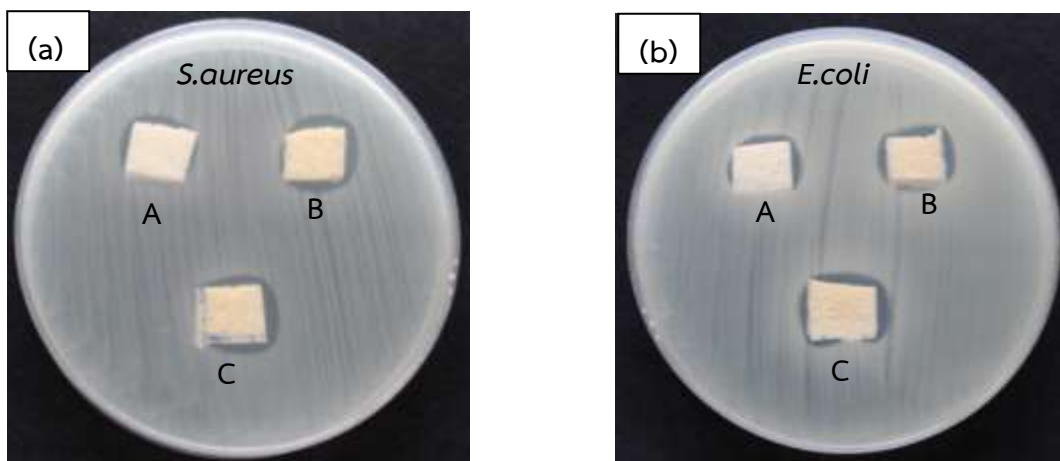
ส่วน (a) เมื่อเติมน้ำมันชั้นสดลงไปโพลีเมษธรรมชาติ (B), (C) และ (D) ในปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr ตามลำดับ พบว่า (B) เกิดโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ลดลงจาก 14.1 เป็น 13.1 มิลลิเมตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันชั้นเป็น 0.190 และ 0.320 phr คือ (C) และ (D)

พบว่า เกิดโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* มีแนวโน้มนำเพิ่มขึ้นเป็น 14.7 และ 15.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ส่วน (b) เมื่อเติมน้ำมันชั้นสกลงไปในโพลีเอทิลีน (B), (C) และ (D) ในปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr ตามลำดับ พบว่าเกิดโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* มีแนวโน้มนำเพิ่มขึ้นจาก 14.5 เป็น 14.6 15.0 และ 16.4 ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า โพลีเอทิลีนที่มีสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* จากสารตัวเร่งที่ใช้ในการเตรียมโพลีเอทิลีนอยู่แล้ว นอกจากนั้นการเติมน้ำมันชั้นสกลงในโพลีเอทิลีนจะช่วยทำให้ ZnO กระจายตัวได้ดีขึ้น และทำให้ขนาดของเซลล์เล็กลง จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ได้อีกด้วย

#### 4.5.3 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอทิลีนผสม



รูปที่ 4.39 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) *S.aureus* และ (b) *E.coli* ของ (A) โพลีเอทิลีน, (B) โพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสลด 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.014 phr และ (C) โพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสลด 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.028 phr

จากรูปที่ 4.39 (a) และ (b) การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เติมลงในโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสลด พบว่า (A) โพลีเอทิลีนสามารถเกิดโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง *S.aureus* และ *E.coli* ได้ 13.9 และ 13.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากสารตัวเร่ง เช่น ZDEC ZMBT Sulpher และ ZnO ที่เติมลงไปในขั้นตอนการเตรียมโพลีเอทิลีน สารเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ จึงทำให้เกิดโซนยับยั้งขึ้น

ส่วน (a) เมื่อเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นสลด (B) และ (C) 0.014 และ 0.028 phr ตามลำดับ พบว่า (B) เกิดโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* เพิ่มขึ้นจาก 13.9 เป็น 15.3 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็น 0.028 phr คือ (C) พบว่า เกิด

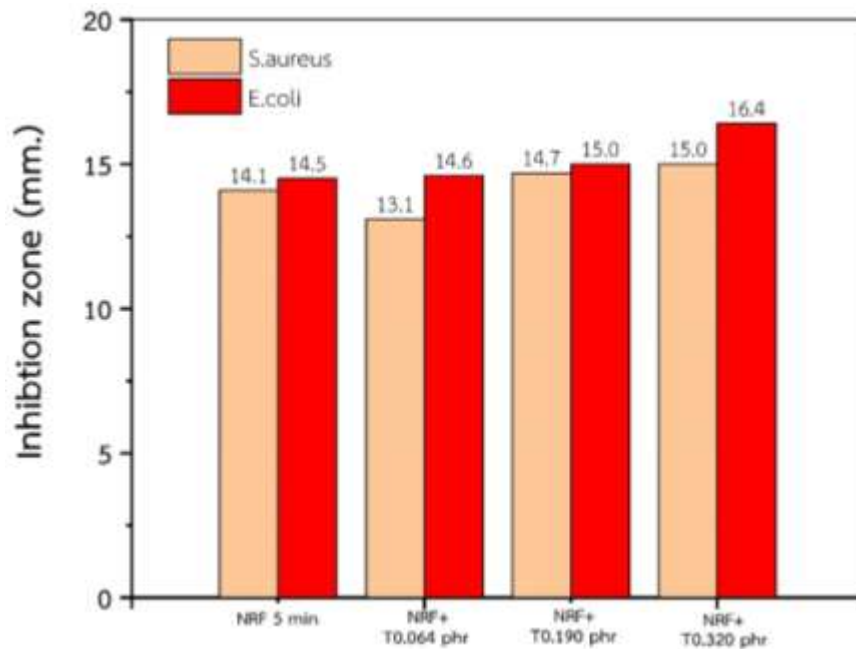
โซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นจาก 15.3 เป็น 15.6 มิลลิเมตร เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย [55,76] เมื่อเติมลงไปโพลีเมอร์ยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสดจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้

ส่วน (b) เมื่อเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปโพลีเมอร์ยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสด (B) และ (C) 0.014 และ 0.028 phr ตามลำดับ พบว่า (B) เกิดโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* เพิ่มขึ้นจาก 13.5 เป็น 14.8 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็น 0.028 phr คือ (C) พบว่า เกิดโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นจาก 14.8 เป็น 15.4 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และในรูปที่ 4.45 เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เมื่อเติมลงไปโพลีเมอร์ยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสดจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้

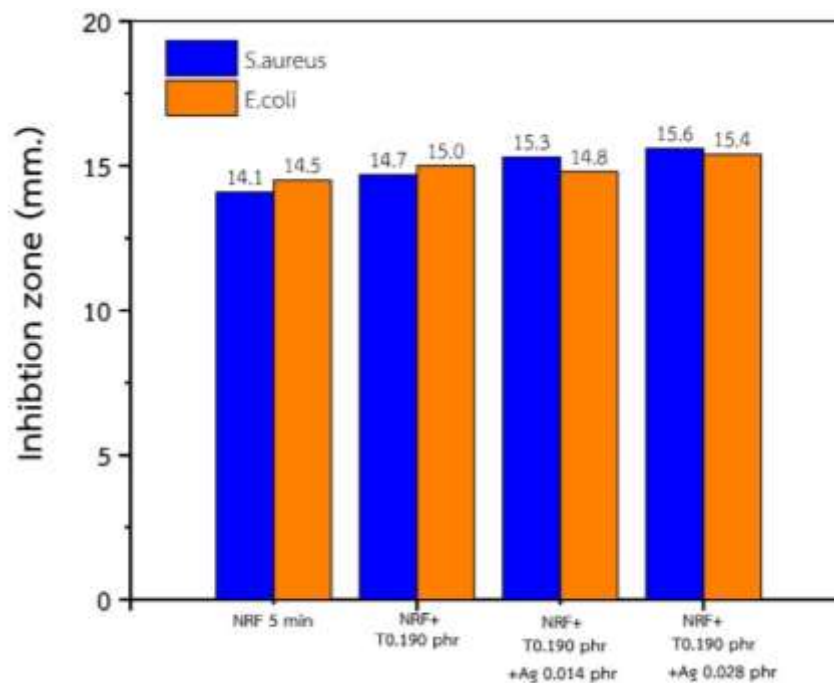
ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงในโพลีเมอร์ยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง *S.aureus* และ *E.coli* ได้ เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

**ตารางที่ 4.6** โซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ของโพลีเมอร์ยางธรรมชาติ โพลีเมอร์ยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสด และโพลีเมอร์ยางธรรมชาติผสมน้ำขมิ้นชันสดกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณต่าง ๆ

ตัวอย่าง	โซนยับยั้ง (mm.)	
	<i>S.aureus</i>	<i>E.coli</i>
NRF	14.1	14.5
NRF + T0.064 phr	13.1	14.6
NRF + T0.190 phr	14.7	15.0
NRF + T0.320 phr	15.0	16.4
NRF + T0.190 phr + Ag0.014 phr	15.3	14.8
NRF + T0.190 phr + Ag0.028 phr	15.6	15.4



รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติ และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดที่ปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr



รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) ของโพลีเมอร์ธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดที่ 0.190 phr และโพลีเมอร์ธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสัดที่ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.014 และ 0.028 phr

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในการเตรียมโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยกระบวนการดัดแปลง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยใช้ไขมันชั้นจากไขมันผงเป็นตัวรีดิวซ์แทนสารเคมีที่มีความอันตรายต่อสุขภาพและราคาแพง ด้วยกระบวนการไมโครเวฟ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ได้โพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนในรูปแบบใหม่ที่แตกต่างจากท้องตลาดทั่วไป ที่มีคุณสมบัติไร้กลิ่น และเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ โดยผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ สมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอทิลีนผสมที่เตรียมได้ สามารถสรุปได้ดังนี้

เทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสง สามารถยืนยันการเกิดขึ้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมจากกระบวนการไมโครเวฟ โดยใช้สารธรรมชาติคือน้ำมันชั้นจากไขมันชั้น ที่มีโมเลกุลของสารประกอบเคอร์คูมินเป็นตัวรีดิวซ์และเป็นสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพ โดยปราศจากการใช้สารเคมีที่อันตรายต่อสุขภาพ โดยปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 420 นาโนเมตร นอกจากนี้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านก็ยังสามารถยืนยันการเกิดขึ้นและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้อีกด้วย โดยขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจะใหญ่ขึ้นตามปริมาณของน้ำมันชั้นที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์ เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีสามารถยืนยันโมเลกุลของของเคอร์คูมินที่อยู่ในผงไขมันชั้นและน้ำมันชั้นสด

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีช่วยยืนยันโครงสร้างของโพลีเอทิลีนได้ นอกจากนี้การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุช่วยยืนยันว่ามีอนุภาคซิลเวอร์นาโนกระจายตัวอยู่บนโพลีเอทิลีนผสมน้ำมันชั้นกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่จริง

สมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีนที่เตรียมได้พบว่า เวลาในการตีฟองที่เหมาะสมคือ 5 นาที ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนเพื่อรองรับการต้านทานแรงกดอัดได้ นอกจากนี้การเติมน้ำมันชั้นลงไปโพลีเอทิลีน จะทำให้โพลีเอทิลีนมีคุณสมบัติในการต้านทานแรงดึงและแรงกดอัดได้น้อยลง เนื่องจากน้ำมันชั้นไปทำให้เกิดการยุบตัวของฟอง และการเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนนั้นจะทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างบางส่วนของยางพารา ทำให้

เกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ส่งผลทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงลดลง แต่ค่าการต้านทานแรงกดอัดจะเพิ่มขึ้น

สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพนยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเมื่อเติมน้ำมันชั้นสัด และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ซึ่งสามารถยับยั้งได้ทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) โดยขนาดของโชนยับยั้งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของน้ำมันชั้นสัด และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเติมสารตัวเติมที่เป็นของเหลวลงไปในโพนยางธรรมชาติ ไม่ควรเติมเกินกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักยางแห้ง เพราะจะทำให้พองยางเกิดการยุบตัว ส่งผลทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปโพนยางธรรมชาติได้

2. ควรสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนให้ได้ความเข้มข้นที่สูง เพื่อหลีกเลี่ยงการเติมลงไปในโพนยางธรรมชาติในปริมาณมาก

3. ไม่ควรเติมอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงไปในโพนยางธรรมชาติโดยตรง ควรผสมกับน้ำมันชั้นสัดก่อน เนื่องจากจะทำให้เกิดการจับตัวกันของพองยาง ทำให้โพนยางธรรมชาติเสียรูปและทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนกระจายตัวได้ไม่ดี

4. หลีกเลี่ยงการเตรียมโพนยางธรรมชาติในวันที่อากาศร้อนเกิน 42 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้แอมโมเนียที่อยู่ในน้ำยางธรรมชาติเกิดการระเหยเร็วเกินไป ทำให้น้ำยางเสียสภาพก่อนที่ขึ้นรูปเป็นโพนยางธรรมชาติ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพาณิชย์. 2560. **สินค้าส่งออก 10 อันดับแรก**. [Online]. Available : <https://www.prachachat.net/economy/news-58546>.
- [2] ดร.พงษ์ธร แซ่อู่. 2556. **ชนิดของยางและการใช้งาน**. [Online]. Available : <https://mahidolrubber.org/files/technologys.pdf>.
- [3] การยางแห่งประเทศไทย. 2561. **ราคายางวันนี้**. [Online]. Available : <http://www.rubber.co.th/rubber2012/menu5.php>.
- [4] เมดไทย. 2560. **ขมิ้นชัน**. [Online]. Available : <https://medthai.com/ขมิ้นชัน>.
- [5] เกษตรอินเทรนด์. 2562. **เปิดสรรพคุณทุกส่วนของ “ขมิ้นชัน” สมุนไพรพื้นบ้านที่ใช้กันมา ยาวนานของคนไทย**. [Online]. Available : [https://www.sentangsedtee.com/farming-trendy/article\\_118594](https://www.sentangsedtee.com/farming-trendy/article_118594).
- [6] ไทยรัฐออนไลน์. 2563. **ซิลเวอร์นาโนฆ่าสารพัดเชื้อ**. [Online]. Available : <https://www.thairath.co.th/news/local/1756475>.
- [7] AIR FILTER. 2562. **แก้ปัญหาแอร์เหม็นที่ต้นเหตุ นาโนว่าสมารถซิลเวอร์**. [Online]. Available : [https://www.airfilter.in.th/silver\\_nano-spray-250ml](https://www.airfilter.in.th/silver_nano-spray-250ml).
- [8] ศรีนยา โพธิ์แดง. 2557. “การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนจากเปลือกผลไม้” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [9] เณศรา แก้วคง, เลิศณรงค์ ศรีพนม, เจ๊ะฮาซัน เจ๊ะอุบง, ศิริวรรณ ตี๋ภู. 2014. “การสังเคราะห์ และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์โดยวิธีดีคักชันทางเคมี.” *RMUTT Journal*. 4 : 1-10.
- [10] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2558. **น้ำยาง**. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/น้ำยาง>.
- [11] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2559. “การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติ.” *วารสารกร วิทยาศาสตร์บริการ*. : 7-8.
- [12] SurpassLatex. 2557. **น้ำยางธรรมชาติ**. [Online]. Available : [http://www.surpass-latex.com/index.php?route=content/content&content\\_id=137](http://www.surpass-latex.com/index.php?route=content/content&content_id=137).
- [13] Science news. 2562. **สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ**. [Online]. Available : [http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com\\_content&task=view&id=141&Itemid=0](http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=0).
- [14] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2555. **เทคโนโลยีน้ำยาง (Latex Technology)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). : 26-28.

- [15] Somkit Chuenarrom. 2557. **ผลกระทบจากความเสถียรของน้ำยาง**. [Online]. Available : <https://rubberdigest.com/?p=166>.
- [16] Neo Plastomer. 2562. **ยางธรรมชาติ**. [Online]. Available : <https://www.neoplast.biz/index.php?lay=show&ac=article&Ntype=1&Id=174420>.
- [17] กิมฮง หาดใหญ่. 2562. **ยางแผ่นรมควัน**. [Online]. Available : <http://www.kimhong.co.th/ยางแผ่นรมควัน-ribbed-smoked-sheet/>.
- [18] บุญเลื่อน พรหมประทานกุล. 2562. **ยางเครป**. [Online]. Available : <https://www.77kooded.com/content/663759>.
- [19] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2556. **ผลผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทย**. [Online]. Available : <http://www.thainr.com/th/?detail=stat-world>.
- [20] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). 2558. **การนำยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์**. [Online]. Available : <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/para/used/01-03.php>.
- [21] บริษัท เวลพาส จำกัด. 2558. **หนังยาง**. [Online]. Available : <http://www.thaitechno.net/t1/productdetails.php?id=15507&uid=35487>.
- [22] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2558. **ล้อยางยนต์**. [Online]. Available : <http://rubber.oie.go.th/>.
- [23] Wendy Liu. 2560. **หมอนยางพารา**. [Online]. Available : <https://thai.alibaba.com/product-detail/good-quality-natural-latex-foam-neck-pillow-60739420756.html>.
- [24] Alton. 2562. **Potassium oleate**. [Online]. Available : <https://massageadvancer.com/global-potassium-oleate-market-2019-top-trends-by-players-victorian-chemical-company-viva-corporation-acme-chem-ka/>.
- [25] Martin S. Frant, James W. Ross. 1968. "Use of a Total Ionic Strength Adjustment Buffer for Electrode Determination of Fluoride in Water Supplies." *Analytical Chemistry*. 40(7) : 1168-1171.
- [26] Sigma-Aldrich. 2562. **Diphenylguanidine**. [Online]. Available : <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/d207756?lang=en&region=TH>.
- [27] Sigma-Aldrich. 2562. **Zinc diethyldithiocarbamate**. [Online]. Available : <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/329703?lang=en&region=TH>.
- [28] Chemical Book. 2562. **Zinc 2-mecaptobenzthiozolate**. [Online]. Available : [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB0150428.htm](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB0150428.htm).

- [29] ที่นอนยางพารา หมอนยางพารา original. 2558. **ความแตกต่างระหว่าง Dunlop Process และ Talalay Process.** [Online]. Available : <https://www.facebook.com/notes/ที่นอนยางพารา-หมอนยางพารา-original>.
- [30] Sleep works. 2561. **Can Talalay Latex be better than Dunlop?**. [Online]. Available : <https://sleepworksny.com/can-talay-latex-be-better-than-dunlop>.
- [31] Biogang. 2561. **ขมิ้น**. [Online]. Available : [http://www.biogang.net/plant\\_view.php?uid=67073&id=221784](http://www.biogang.net/plant_view.php?uid=67073&id=221784).
- [32] Wikipedia. 2561. **ขมิ้นชัน**. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/ขมิ้นชัน>.
- [33] Wikipedia. 2561. **เคอร์คูมิน**. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/เคอร์คูมิน>.
- [34] Sudarat Onsurathum, Thidarut Boonmars, Somchai Pinlaor. 2012. "Effect of Curcumin on Opisthorchiasis and Cholangiocarcinoma in Animal Models." *Srinagarind Medical Journal*. 27 : 389-396.
- [35] Supat Buddee, Sumpun Wongnawa, Pimpaporn Sriprang, Chaval Sriwong. 2014. "Curcumin-sensitized TiO<sub>2</sub> for enhanced photodegradation of dyes under visible light." *Journal of Nanoparticle Research*. 16 : 2336.
- [36] Kruboa. 2560. **Silver Nano อีกหนึ่งอาวุธกำจัดเชื้อโรค**. [Online]. Available : <http://www.thelittlegympama3.com/index.php?lay=show&ac=article&id=538690877&Ntype=3>.
- [37] กานต์พิมล กรไกร และ รินา ภัทรมานนท์. 2560. "อนุภาคเงินนาโนสังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชและความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์." *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.* 45(1) : 34-52.
- [38] ธนัษพร ฐิตะกาญจน์, อภิษฎา อมรศุภรศาสตร์. 2561. "การพัฒนาโพลีเมอร์นาโนโดยใช้กราฟีนออกไซด์และซิลเวอร์นาโน" โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] Pranlekha Traiwatcharanon, Kriengkri Timsorn, Chatchawal Wongchoosuk. 2012. "Flexible room-temperature resistive humidity sensor based on silver nanoparticles." *Material Research Express*. 4(8) : 085038.
- [40] J.Das, M. Paul Das, P. Velusamy. 2013. "Sesbania grandiflora leaf extract mediated green synthesis of antibacterial silver nanoparticles against selected human pathogens." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 104 : 265-270.

- [41] Siamchemi. 2562. **ซิลเวอร์นาโน และประโยชน์ของซิลเวอร์นาโน**. [Online]. Available : <https://www.siamchemi.com/ซิลเวอร์นาโน>.
- [42] นิราทร ทองคำแท้. 2562. **อาณาจักรมอเนอร่า**. [Online]. Available : [http://119.46.166.126/self\\_all/selfaccess12/m6/684/lesson1-4](http://119.46.166.126/self_all/selfaccess12/m6/684/lesson1-4).
- [43] Wikipedia. 2562. **Staphylococcus**. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/Staphylococcus>.
- [44] Microbiology Laboratory Turkey. 2562. **Streptococcus Spp**. [Online]. Available : <https://microbiologylaboratoryturkey.blogspot.com/2018/11/streptococcus-spp.html>.
- [45] Kenneth Todar. 2560. **Bacillus anthracis and Anthrax**. [Online]. Available : <http://textbookofbacteriology.net/Anthrax.html>.
- [46] Wikipedia. 2562. **Laptospira interrogans**. [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Leptospira\\_interrogans](https://en.wikipedia.org/wiki/Leptospira_interrogans).
- [47] Saharat Jantararirat. 2562. **ความแตกต่างระหว่างแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ**. [Online]. Available : <https://www.scribd.com/doc/83645488>.
- [48] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนาปนนท์. 2562. **Cell wall / ผนังเซลล์**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4077/cell-wall-ผนังเซลล์>.
- [49] APIC. 2562. **Staphylococcus aureus**. [Online]. Available : [https://apic.org/monthly\\_alerts/staphylococcus-aureus](https://apic.org/monthly_alerts/staphylococcus-aureus).
- [50] Wikipedia. 2562. **Staphylococcus aureus**. [Online]. Available : [https://th.wikipedia.org/wiki/Staphylococcus\\_aureus](https://th.wikipedia.org/wiki/Staphylococcus_aureus).
- [51] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนาปนนท์. 2562. **Staphylococcus aureus / สเตฟิโลค็อกคัส ออเรียส**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1197/staphylococcus-aureus>.
- [52] Bio Cote. 2562. **Five Facts about E.coli**. [Online]. Available : <https://www.biocote.com/blog/five-facts-e-coli>.
- [53] Wikipedia. 2562. **Escherichia coli**. [Online]. Available : [https://th.wikipedia.org/wiki/Escherichia\\_coli](https://th.wikipedia.org/wiki/Escherichia_coli).
- [54] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนาปนนท์. 2562. **Escherichia coli / E. coli**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1125/escherichia-coli-e-coli>.

- [55] W.G.I.U Rathnake, H. Ismail, A. Baharin, A.G.N.D. Darsanasiri, Sanath Rajapakse. 2012. "Synthesis and characterization of nano silver based natural rubber latex foam for imparting antibacterial and anti-fungal properties." *Polymer Testing*. 31(5) : 586-592.
- [56] His-Wen Tien, Yuan-Li Huang, Shin-Yi Yang, Jen-Yu Wang, Chen-Chi M.Ma. 2011. "The production of graphene nanosheets decorated with silver nanoparticles for use in transparent, conductive films." *Carbon*. 49(5) : 1550-1560.
- [57] Fouad K. Alsammaraie, Wei Wang, Peng Zhou, Azlin Mustapha, Mengshi Lin. 2018. "Green Synthesis of Silver Nanoparticles using Turmeric Extracts and Investigation of their Antibacterial Activities." *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 171 : 398-405
- [58] Warot Prasanseang, Chaval Sriwong, Kittisak Choojun. 2017. "Effect of Synthesized Ag Nanoparticles by Using the Different Amounts of Polyvinylpyrrolidone for Ag-Natural Rubber Hybrid Sheets and their Antibacterial Properties." *Key Engineering Materials*. 751 : 270-276.
- [59] Xiaocui Liu, Lijun You, Solaiman Tarafder, LinZou, Zhe xiang Fang, Jingdi Chen. 2019. "Curcumin-releasing chitosan/aloe membrane for skin regeneration." *Chemical Engineering Journal*. 359 : 1111-1119.
- [60] G. Devanand Venkatasubbu, T. Anusuya. 2017. "Investigation on Curcumin nanocomposite for wound dressing." *International Journal of Biological Macromolecules*. 98 : 366-378.
- [61] Supaporn Sangsrichan. 2562. **UV-Visible Spectroscopy (UV-Vis)**. [Online]. Available : <https://www.science.mju.ac.th>.
- [62] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ออนไลน์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2562. **Electron microscope กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน**. [Online]. Available : <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.
- [63] Central scientific services. 2562. **Transmission electron microscope (TEM)**. [Online]. Available : <https://www.newcastle.edu.au/research-and-innovation/resources/central-scientific-services/emx/tem>.
- [64] Department of Earth & Atmospheric Sciences. 2562. **Scanning electron microscope**. [Online]. Available : <https://eas.ualberta.ca/sem>.

- [65] Synchrotron Light Research Institute. 2562. **X-Ray Diffractometer (XRD)**. [Online]. Available : <https://www.slri.or.th/bdd/th/22/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>.
- [66] Synchrotron Light Research Institute. 2562. **เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy)**. [Online]. Available : <https://www.slri.or.th/th/beamline/bl41.html>.
- [67] Bara Scientific. 2562. **Fourier - Transform Infrared Spectrometer**. [Online]. Available : <http://www.barascientific.com/products/shimadzu/analytical/spectro/thai/FTIR/IR-Prestige21.php>.
- [68] SMK AUTOMATION. 2554. **UNIVERSAL TESTING MACHINE (UTM)**. [Online]. Available : <http://www.smkautomation.com/index.php?lay=show&ac=article&id=539723514>.
- [69] A.M.Elgorban, A.E.R.M.El-samawaty, O.H.Abd-Elkader, M.A.Yassin, S.R.MSayed, M.Khan, S.FAdil. 2017. “ Bioengineered silver nanoparticles using *Curvularia pallescens* and its fungicidal activity against *Cladosporium fulvum*.” *Saudi Journal of Biological Sciences*. 24 : 1522-1528.
- [70] R.Karthik, Y.S.Hou, S.M.Chen, A.Elangovan, M.Ganesan, P.Muthukrishnan. 2016. “ Eco-friendly synthesis of Ag-NPs using *Cerasus serrulata* plant extract -Its catalytic, electrochemical reduction of 4-NPh and antibacterial activity.” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 35 : 330-339.
- [71] S.G.Balwe, V.V.Shinde, A.A.Rokade, S.S.Park, Y.T.Jeong. 2017. “ Green synthesis and characterization of silver nanoparticles (Ag NPs) from extract of plant *Radix Puerariae* : An efficient and recyclable catalyst for the construction of pyrimido[1,2-b]indazole derivatives under solvent-free conditions.” *Catalysis Communications*. 99 : 121-126.
- [72] V.Ravichandrana, S.Vasanthib, S.Shalinic, S.A.A.Shahd, M.Tripathyd, N.Paliwala. 2019. “ Green synthesis, characterization, antibacterial, antioxidant and photocatalytic activity of *Parkia speciosa* leaves extract mediated silver nanoparticles.” *Results in Physics*. 15 : 102565.
- [73] S.Rahman, P.Varunkuma, K.Anusha, C.Kalaiarasi, A.Shivashangari, K.Ravikumar. 2017. “ Facile synthesis of Curcuma longa tuber powder engineered metal nanoparticles for bioimaging applications.” *Journal of Molecular Structure*. 1129 : 8-16.

- [74] E.Vaghari, H.Najian, Y.Najain, M.Malmiri, H.Berenjain. 2018. "Microwave-assisted green synthesis of silver nanoparticles using *Juglans regia* leaf extract and evaluation of their physico-chemical and antibacterial properties." *Antibiotics*. 7(3) : 68.
- [75] M.Rarveen, F.Ahmad, AM.Malla, S.Azaz. 2016. "Microwave-assisted green synthesis of silver nanoparticles from *Fraxinus excelsior* leaf extract and its antioxidant assay." *Appl Nanosci*. 6 : 267-276.
- [76] N.Lyanna, N.Lalley, J.Han, C.Dionysiou, D.Varma. 2014. "Synthesis of silver and gold nanoparticles using antioxidants from blackberry, blueberry, Pomegranate, and turmeric extracts." *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2(7) : 1717-1723.
- [77] V.Yadav, S.Suresh, K.Devi, S.Yadav. 2009. "Effect of Cyclodextrin Complexation of Curcumin on its Solubility and Antiangiogenic and Anti-inflammatory Activity in Rat Colitis Model." *AAPS PharmSciTech*. 10(3) : 752-762.
- [78] E.Rohaeti, M.Rafi, U.D.Syafitri, R.Heryanto. 2015. "Fourier transform infrared spectroscopy combined with chemometrics for discrimination of *Curcuma longa*, *Curcuma xanthorrhiza* and *Zingiber cassumunar*." *Spectrochimica Acta Part A: Molecule and Biomolecular Spectroscopy*. 137 : 1244-1249.
- [79] F.Heidarpour, W.A.K. Ghani, F.R.B. Ahmadun, S.Sobri, M.Zargar, M.R.Mozafari. 2010. "NANO SILVER-COATED POLYPROPYLENE WATER FILTER: I. MANUFACTURE BY ELECTRON BEAM GUN USING A MODIFIED BALZERS 760 MACHINE." *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 5(3) : 787-796.
- [80] N.T. Thoung, T.A.Dung, N.H.Yusof, S.Kawahara. 2020. "Controlling the size of silica nanoparticles in filler nanomatrix structure of natural rubber." *Polymer*. 195 : 122444.
- [81] S.J.Hashemi, A.Sadooghi, K.Rahmani, S.Nokbehrosta. 2020. "Experimental determining the mechanical and stiffness properties of natural rubber FRT triangle elastic joint composite reinforcement by glass fibers and micro/nano particles." *Polymer Testing*. 85 : 106461.
- [82] S.Sirikulchaikij, R.Kokoo, M.Khangkhamno. 2019. "Natural rubber latex foam production using air microbubbles: microstructure and physical properties." *Material letters*. 260 : 126916.
- [83] K.Mam, R.Dangtungee. 2019. "Effects of silver nanoparticles on physical and antibacterial properties of natural rubber latex foam." *Materials Today*. 17(4) : 1914-1920.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การหาความเข้มข้นของน้ำขมชั้นสด

ทำได้โดยการปิเปตสารแขวนลอยน้ำขมชั้นสด 1 มิลลิลิตร นำไปอบแห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ดังตารางต่อไปนี้

ครั้งที่	น้ำหนัก (มิลลิกรัม)
1	30.0
2	31.4
เฉลี่ย	32.2

ดังนั้นความเข้มข้นของน้ำขมชั้นสดที่เตรียมได้คือ 32.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

### การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ทำได้โดยการปิเปตสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน 1 มิลลิลิตร นำไปอบแห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ดังตารางต่อไปนี้

ครั้งที่	น้ำหนัก (มิลลิกรัม)
1	6.30
2	7.60
เฉลี่ย	6.95

ดังนั้นความเข้มข้นของสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เตรียมได้คือ 6.95 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

### การคำนวณเป็น phr (Per hundred rubber)

น้ำยางชั้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 250 กรัม จะมีเนื้อยางอยู่  $(0.60) \times 250 = 150$  กรัม หรือ 150,000 มิลลิกรัม

- เติมน้ำขมชั้นสด 3 มิลลิลิตร จะมีขมชั้นอยู่  $3 \times 32.4 = 97.2$  มิลลิกรัม คิดเป็น

$$\frac{97.2}{150,000} \times 100 = 0.064 \text{ phr}$$

- เติมน้ำขมชั้นสด 9 มิลลิลิตร จะมีขมชั้นอยู่  $9 \times 32.4 = 291.6$  มิลลิกรัม คิดเป็น

$$\frac{291.6}{150,000} \times 100 = 0.190 \text{ phr}$$

- เติมน้ำมันชั้นสด 15 มิลลิลิตร จะมีชั้นอยู่  $15 \times 32.4 = 291.6$  มิลลิกรัม คิดเป็น  $\frac{291.6}{150,000} \times 100 = 0.320$  phr
- เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน 3 มิลลิลิตร จะมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่  $3 \times 6.95 = 20.85$  มิลลิกรัม คิดเป็น  $\frac{20.85}{150,000} \times 100 = 0.014$  phr
- เติมสารแขวนลอยอนุภาคซิลเวอร์นาโน 6 มิลลิลิตร จะมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่  $6 \times 6.95 = 41.70$  มิลลิกรัม คิดเป็น  $\frac{41.70}{150,000} \times 100 = 0.028$  phr

### การคำนวณปริมาณสาร

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เตรียมโพลีเมอร์ในระดับห้องปฏิบัติการ จึงเป็นเรื่องยากที่ต้องชั่งสาร เนื่องจากการเตรียมในระดับห้องปฏิบัติการนี้ใช้สารต่าง ๆ ในปริมาณที่น้อย จึงได้ใช้วิธีการคำนวณหาปริมาตรของสารแต่ละตัวแทน เพื่อหลีกเลี่ยงการที่สารจะเกาะติดกับภาชนะที่ใช้ชั่งและให้ได้สารใกล้เคียงกับสูตรมากที่สุด โดยการใช้การปิเปตสารแต่ละตัวมา 1 มิลลิลิตร ทำการชั่งสารเหล่านั้น เพื่อหาความหนาแน่นของแต่ละสารเพื่อนำไปหาปริมาตรที่ต้องใช้จริง

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักเฉลี่ยของสารเคมีที่ใช้เตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติ

สารเคมี	น้ำหนักครั้งที่ 1 (กรัมต่อมิลลิลิตร)	น้ำหนักครั้งที่ 2 (กรัมต่อมิลลิลิตร)	น้ำหนักครั้งที่ 3 (กรัมต่อมิลลิลิตร)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัมต่อมิลลิลิตร)
10% K-Oleate	0.9959	1.009	1.0008	1.0019
50% Sulphur	1.3262	1.2952	1.3342	1.3185
50% ZDEC	1.1575	1.1661	1.1556	1.1597
50% ZMBT	1.0788	1.0699	1.0629	1.0705
50% Wingstay - L	1.013	1.006	1.016	1.0117
50% ZnO	1.639	1.6542	1.6431	1.6454
33% DPG	1.0387	1.0319	1.0355	1.0354
12.5% SSF	1.0996	1.0848	1.039	1.0745

ตารางที่ ก.2 ปริมาตรที่ต้องปิเปตของสารเคมีแต่ละตัวในการเตรียมโพนอยางธรรมชาติ

สารเคมี	p/hr	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนัก เปียก (กรัม)	ปริมาตรที่ต้อง ปิเปต (มิลลิลิตร)
10% K-Oleate	1.8	2.7000	27.0000	26.95
50% Sulphur	2	3.0000	6.0000	4.55
50% ZDEC	1	1.5000	3.0000	2.59
50% ZMBT	1	1.5000	3.0000	2.80
50% Wingstay - L	1	1.5000	3.0000	2.97
50% ZnO	5	7.5000	15.0000	9.12
33% DPG	1.4	2.1000	6.3636	6.15
12.5% SSF	1.2	1.8000	14.4000	13.40





หมายเหตุ : น้ำหนักแห้ง คือ น้ำหนักจริงของสารเมื่อแห้งตัว

น้ำหนักเปียก คือ น้ำหนักของสารแขวนลอยที่ต้องชั่ง

ปริมาตรที่ต้องปิเปต คัดจาก  $\frac{\text{น้ำหนักเปียกของสารนั้นๆ}}{\text{น้ำหนักเฉลี่ยของสารนั้นๆ จากตารางที่ ก-1}} = \text{ปริมาตรที่ต้องปิเปต}$

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ภาพถ่ายของโพนยางธรรมชาติ และโพนยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสดที่ปริมาณ 0.064 0.190 และ 0.320 phr

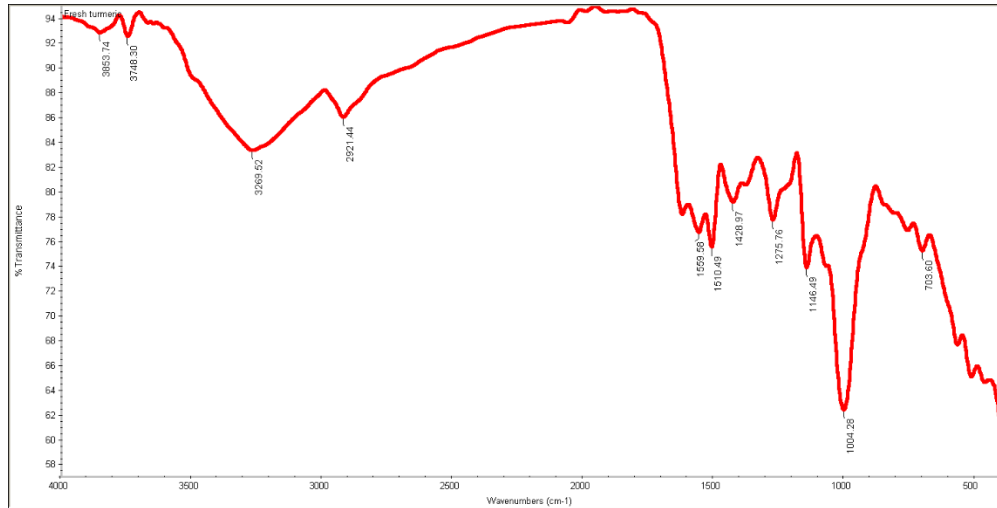
			
NRF	NRF+T0.064 phr	NRF+T0.190 phr	NRF+T0.320 phr

ตารางที่ ข.2 ภาพถ่ายของโพนยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสดที่ปริมาณ 0.190 phr และ โพนยางธรรมชาติผสมน้ำมันชั้นสดที่ปริมาณ 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปริมาณ 0.014 และ 0.028 phr

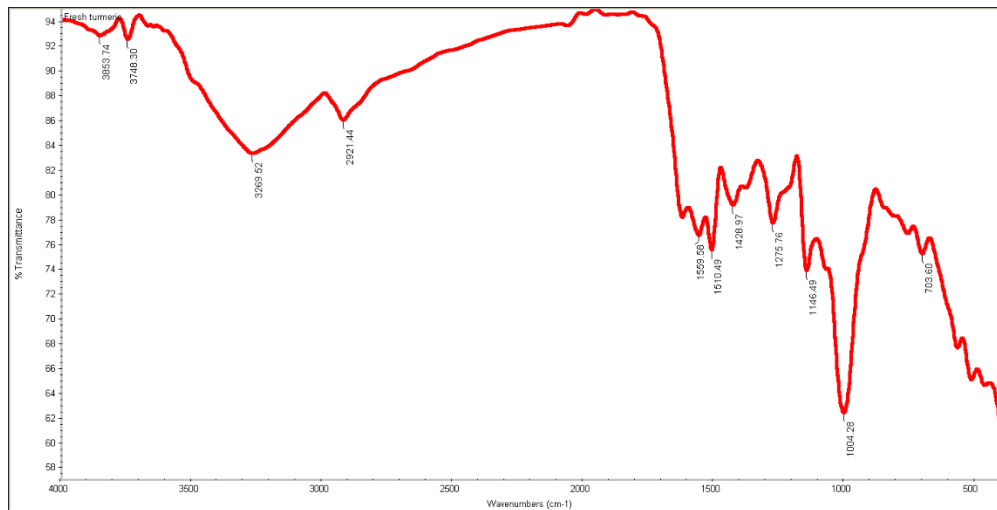
		
NRF+T0.190 phr	NRF+T0.190 phr+ Ag 0.014 phr	NRF+T0.190 phr+ Ag 0.028 phr

## ภาคผนวก ค

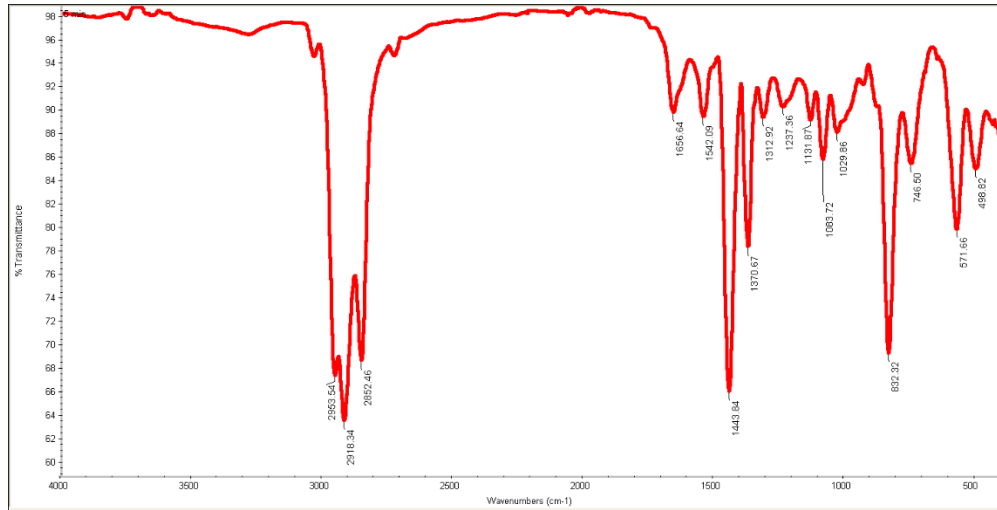
การวิเคราะห์หาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FI-TR)



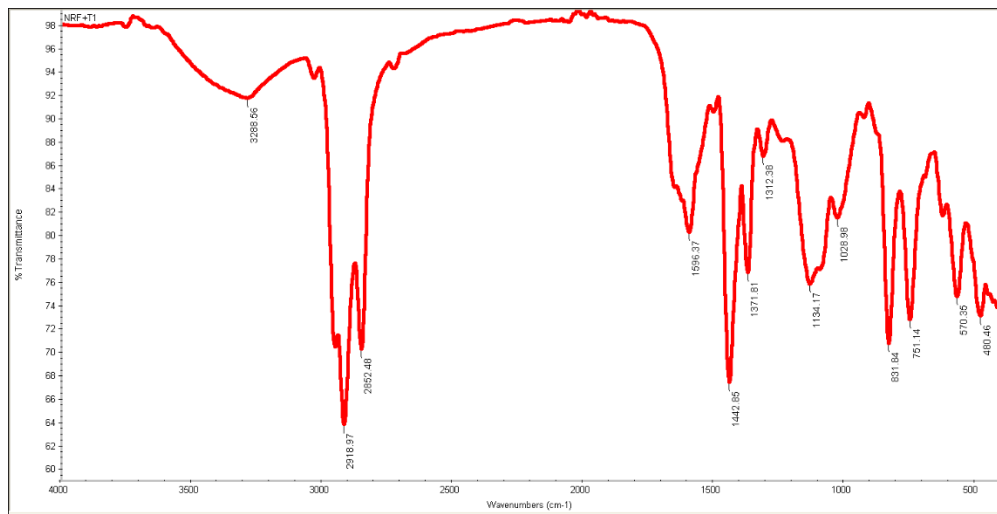
รูปที่ ค.1 กราฟ FT-IR ของขมิ้นสด



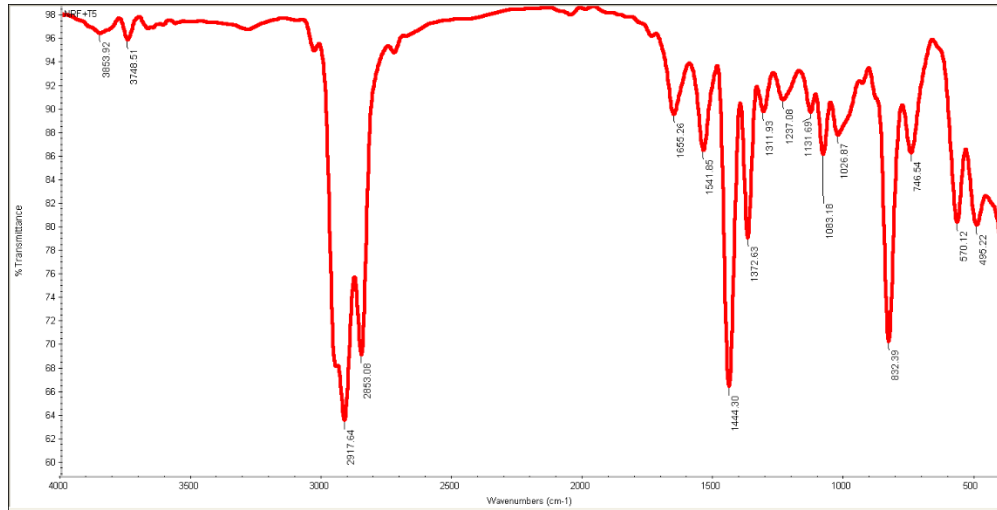
รูปที่ ค.2 กราฟ FT-IR ของผงขมิ้น



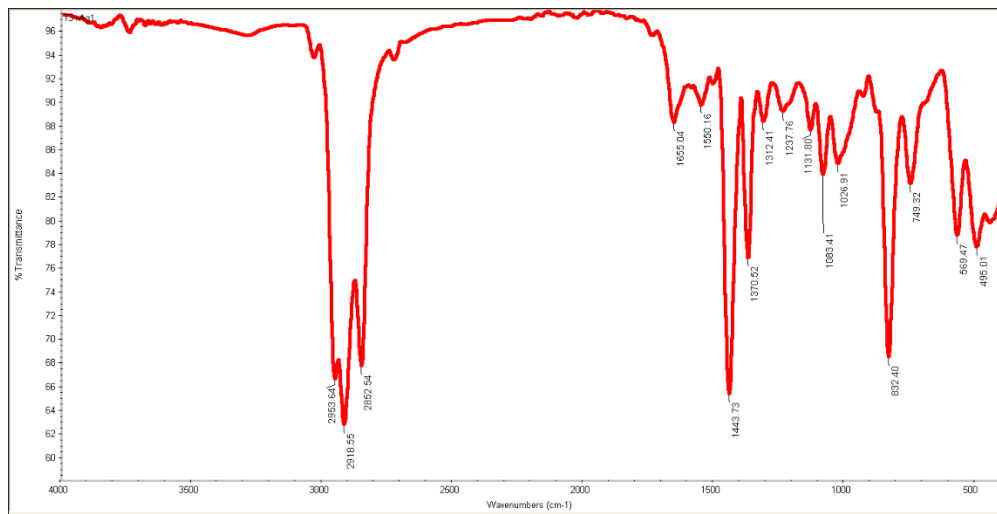
รูปที่ ค.3 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีน



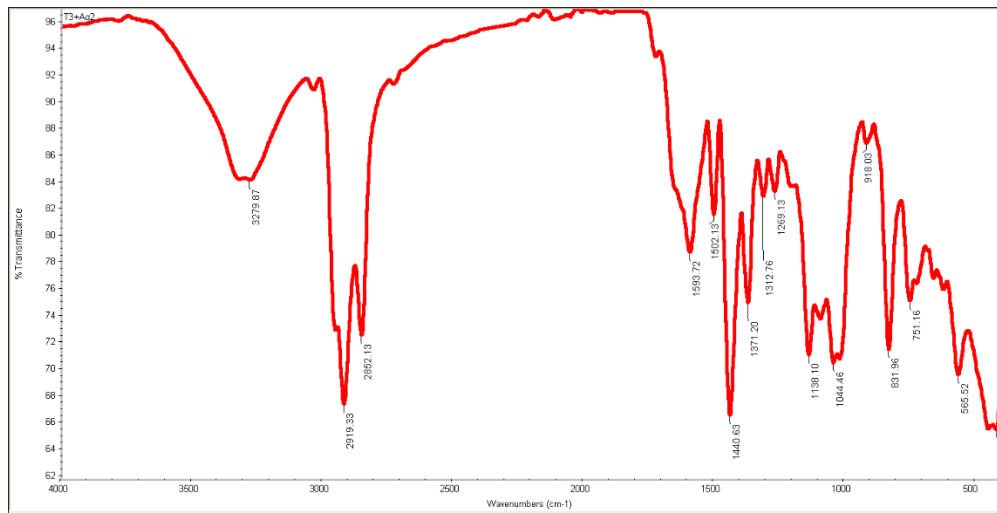
รูปที่ ค.4 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนผสมน้ำขมิ้นชันสด 0.064 phr



รูปที่ ค.5 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนออกไซด์ผสมน้ำขี้เถ้าชั้นสัด 0.320 phr



รูปที่ ค.6 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนออกไซด์ผสมน้ำขี้เถ้าชั้นสัด 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.014 phr



รูปที่ ค.7 กราฟ FT-IR ของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 0.190 phr กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน 0.028 phr

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายมณฑล แสงสว่าง
วัน เดือน ปีเกิด	15 พฤษภาคม 2538
ที่อยู่	90/4 ถนนเลย - ด่านซ้าย ตำบลกุดป่อง อำเภอเมืองเลย จังหวัดเลย 42000
ประวัติการศึกษา	2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.16 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2562 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.66 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมการศึกษา
ผลงานทางวิชาการ	[Poster Presentation] February 13 <sup>th</sup> - 14 <sup>th</sup> , 2020. “Pure And Applied Chemistry International Conference 2020 : Chemistry for Catalyzing Sustainability and Prosperity” IMPACT Forum, Muangthong Thani, Bangkok, Thailand. [Publication] Monthol Saengsawang, Kittisak Choojun, Chaval Sriwong. 2020. “Antibacterial properties of silver nanoparticles synthesized by microwave assisted method: Effect of the contents of curcumin loading.” Pure And Applied Chemistry International Conference 2020 (PACCON 2020). MN20 – MN25.