



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ फिल्मยางธรรมชาติเติมด้วยอนุภาคนาโนของเงิน

โดย อาจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และคณะ

มีนาคม 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ फिल्मยางธรรมชาติเติมด้วยอนุภาคนาโนของเงิน

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. อาจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ | ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. นางสาวเบญจวรรณ ฤกษ์ประเสริฐกุล | ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. นางสาวอนัญพร มงคล | ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ฟิล์มยางธรรมชาติเติมด้วยอนุภาคนาโนของเงิน

(ภาษาอังกฤษ) Silver nanoparticle based natural rubber film

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

หน่วยงาน ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่อยู่ ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 0-2218-7518 โทรสาร 0-2225-5831 E-mail sililux.p@chula.ac.th, spoompradub@yahoo.com

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย น.ส.เบญจวรรณ ฤกษ์ประเสริฐกุล

น.ส.อนัญพร มงคล

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2550 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2551

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง เช่น ถุงมือที่ใช้ในการแพทย์ และถุงยางอนามัย ไม่สามารถต้านเชื้อโรคบางชนิดเข้าสู่ร่างกายได้ หนทางหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ คือ ศึกษาแนวทางที่จะพัฒนาคุณภาพของถุงมือยาง โดยทำการผสมรวมกับอนุภาคนาโนของเงิน เนื่องจากสมบัติของอนุภาคนาโนของเงินมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้มากกว่าการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อโดยทั่ว ๆ ไป และการที่อนุภาคนาโนของเงินมีขนาดเล็กมากจึงเป็นข้อดีในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาป้องกันเชื้อโรคต่างๆ ได้มากขึ้น

วัตถุประสงค์

หาภาวะที่เหมาะสมในการผสมอนุภาคนาโนของเงินกับน้ำยางธรรมชาติ และสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติโดยยังคงรักษาคุณสมบัติในการต้านเชื้อโรคของอนุภาคนาโนของเงินไว้ได้

ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มยางที่ผสมอนุภาคนาโนของเงิน โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผสมอนุภาคนาโนของเงินให้สามารถคงอยู่ในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติได้ และไม่เสื่อมสลายเมื่อได้รับความร้อนหรือแรงกระทำทางกล ตัวแปรสำคัญที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ความหนาของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ อุณหภูมิและเวลาในการวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยาง การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินและทดสอบสมบัติเชิงกลในน้ำยางคอมปาวด์ และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติในการฆ่าเชื้อของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) พบว่าอนุภาคนาโนของเงินสามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำยางคอมปาวด์ได้ดี การเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์ส่งผลให้การจับตัวของน้ำยางเกิดได้เร็วขึ้น แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้หลังจากการขึ้นรูปถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป พบว่าการเติมอนุภาคนาโนของเงินส่งผลให้สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติดีขึ้น เช่น ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัส (Modulus) มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติไปทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ เชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของ *Escherichia coli* (*E. coli*) ด้วย

วิธี film contact พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ≥ 10 ppm สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้สูงถึง 99% และ ~100% ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และ 15 นาที ตามลำดับ จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนของเงินสามารถคงอยู่ในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติได้ ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมในการวัดค่าในชั้นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติคือที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที

สรุปผลการวิจัย

ภาวะที่เหมาะสมในการผสมอนุภาคนาโนของเงินในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติคือที่ความเข้มข้น ≥ 10 ppm ทำการวัดค่าในชั้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที แผ่นฟิล์มยางที่เตรียมได้มีความหนา 1 มิลลิเมตร การเติมอนุภาคนาโนลงในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติได้ และช่วยยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. coli* ได้สูงถึง 99 % และ ~100% ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และ 15 นาที ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองใช้วิธีการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติด้วยแผ่นกระจกส่งผลให้ความหนาของแผ่นฟิล์มยางที่ได้ยังไม่เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตถุงมือยางที่ป้องกันเชื้อโรคได้ ควรมีการศึกษาวิธีการขึ้นรูปโดยการจุ่ม (dipping) เนื่องจากวิธีการนี้สามารถเตรียมแผ่นฟิล์มยางที่มีความบางมาก ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในเนื้อยางธรรมชาติดียิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลดีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ถุงมือยางต่อไป
2. ควรศึกษา stability ของน้ำยางคอมปาวด์สูตรที่ได้คัดเลือกว่าจะอยู่ในภาวะปกติได้นานเพียงใดโดยไม่มีปัญหาต่อกระบวนการการขึ้นรูป
3. ควรเช็คค่า % การจับตัวของน้ำยางมีค่าเท่าไร เพราะแสดงว่าน้ำยางสูญเสียความเสถียร เนื่องจาก MST ลดลงอย่างมาก แสดงว่าอนุภาคนาโนของเงินมีผลต่อความเสถียรของน้ำยาง หรือทำการวัดค่า sludge ที่เกิดขึ้นเป็นกัมเปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จะสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผลงานวิชาการ

นำเสนอผลงานแบบบรรยายในงานประชุมวิชาการครั้งที่ 16 ประจำปี 2551 “Hitachi Science Forum 2008” วันที่ 13 –14 มีนาคม 2551 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับรางวัลชนะเลิศลำดับที่ 3

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาภาวะการเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่ให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้สูงสุด และส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของน้ำยางคอมปาวด์และแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติน้อยที่สุด โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 4 ปัจจัยได้แก่ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ความหนาของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ อุณหภูมิและเวลาในการวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ จากการทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) พบว่าอนุภาคนาโนของเงินสามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำยางคอมปาวด์ นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นชั้นการมีอยู่ของอนุภาคนาโนของเงินด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) น้ำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้ถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการเติมอนุภาคนาโนของเงินไม่ส่งผลต่อค่า %Alkalinity ของน้ำยางคอมปาวด์ แต่จะส่งผลต่อค่า %Total solid content (TSC) และค่า Mechanical stability (MST) โดยการเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์ทำให้น้ำยางคอมปาวด์เกิดการจับตัวได้เร็วขึ้น หลังจากนั้นน้ำยางคอมปาวด์ไปทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มยางที่มีความหนา 1 mm ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที และทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทนต่อการดึงยืด (Tensile), ความแข็ง (Hardness) สมบัติก่อนและหลังการบ่มแรง (Aging) และสมบัติทางด้านการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบด้วยวิธี Film contact โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของ *Escherichia coli* (*E. coli*) พบว่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมากที่สุด โดยที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มดีขึ้น นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ ≥ 10 ppm สามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* ได้สูงถึง 99% และ ~100% ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และ 15 นาที ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้งานวิจัยนี้ทำให้ทราบภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อโรค เพื่อนำไปพัฒนาใช้กับ อุตสาหกรรมการผลิตถุงมือทางการแพทย์ต่อไป

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ, อนุภาคนาโนของเงิน

Abstract

In this research, the silver nanoparticles (Ag-NPs) based on rubber film was prepared in order to investigate the effect of amount of Ag-NPs on the mechanical properties and antibacterial. Four factors of Ag-NPs content, thickness of natural rubber film, curing temperature and curing time were investigated. The well dispersion of Ag-NPs in natural rubber latex compounding was determined by using Transmission Electron Microscopy (TEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). The percentage of alkalinity, percentage of total solid content (TSC) and mechanical stability (MST) of rubber latex compounding were then examined. The results showed that the addition of Ag-NPs had no effect on the percentage of alkalinity, while the change of %TSC and MST was significantly observed. The rubber compounding was vulcanized at 120°C for 30 min and the rubber film was further measured the mechanical properties, i.e., tensile, hardness, aging and antibacterial by using film contact method. Two kinds of bacteria used in this study were Gram-positive of *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) and Gram-negative of *Escherichia coli* (*E. coli*). It was found that Ag-NPs improved the mechanical properties of natural rubber film and completely inhibited *S. aureus* and *E. coli* in natural rubber film at least 10 ppm for 1 h and 15 min, respectively. These results will be useful for the development of rubber glove for industry in the future.

Keywords: natural rubber, silver nanoparticle

สารบัญเรื่อง

หน้า

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

บทคัดย่อ

ก

Abstract

ข

สารบัญเรื่อง

ค

สารบัญตาราง

จ

สารบัญรูปภาพ

ฉ

บทที่ 1 – บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

1

1.2 วัตถุประสงค์

2

บทที่ 2 – ทฤษฎี แนวคิดในการทำงานวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 อนุภาคนาโนของเงินกับการฆ่าเชื้อโรค

2

2.2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

3

บทที่ 3 – วิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมอนุภาคนาโนของเงิน

4

3.2 วิธีการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

4

3.3 วิธีการทดสอบน้ำยางคอมปาวด์

4

3.3.1 การทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (Determination of Total Solids Content)

4

3.3.2 การทดสอบความเป็นด่าง (Determination of Alkalinity)

5

3.3.1 การทดสอบความคงตัวเชิงกล (Determination of Mechanical Stability)

5

3.3.4 การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์

5

ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM)

5

3.4 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยาง

5

3.5 การทดสอบแผ่นฟิล์มยาง

7

3.5.1 การทดสอบการทนต่อการดึงยืด (Tensile) ของแผ่นฟิล์มยาง

7

3.5.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness) ของแผ่นฟิล์มยาง

7

3.5.3 การทดสอบสมบัติก่อนและหลังให้ความร้อน (Aging) ของแผ่นฟิล์มยาง

7

3.5.4 การทดสอบ Antimicrobial activity โดย Film Contact Method

7

บทที่ 4 – ผลการวิจัย

8

บทที่ 5 – วิเคราะห์ผล

5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของน้ำยางคอมปาวด์

21

5.1.1 % Alkalinity

21

5.1.2 Mechanical Stability (MST)

21

5.1.3 % Total solid content (% TSC)

21

5.1.4 การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์

22

โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

22

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

5.2	การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยาง	
5.2.1	การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness)	22
5.2.2	การทดสอบค่าความทนแรงดึง (Tensile properties)	22
5.2.2.1	ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินต่อการทนต่อการดึงยืด	22
5.2.2.2	ผลของความหนาของแผ่นฟิล์มยางต่อการทนต่อการดึงยืด	22
5.2.2.3	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางต่อการทนต่อการดึงยืด	23
5.2.3	การทดสอบการเสื่อมสภาพ (Aging) ของแผ่นฟิล์ม	23
5.2.4	การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ	24
5.2.4.1	การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของ <i>S. aureus</i>	24
5.2.4.2	การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของ <i>E. coli</i>	25
บทที่ 6 – สรุปผล		
6.1	การทดสอบความคงตัวของน้ำยางต่อเครื่องมือกล	26
6.2	การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	26
6.3	การทดสอบค่าความแข็ง	26
6.4	การทดสอบค่าความคงตัวต่อแรงดึง	26
6.5	การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Aging properties)	27
6.6	การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ	27
6.7	ข้อเสนอแนะ	27
เอกสารอ้างอิง		28
ภาคผนวก		
ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์		30
คำชี้แจงแก้ไขรายงานฉบับสมบูรณ์		31

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1	4
3-2	6
4-1	15
4-2	17
4-3	18
4-4	19

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2-1	ผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ (A) และ แกรมบวก (B)	2
2-2	เซลล์แบคทีเรีย <i>P. aeruginosa</i> ที่ไม่มีอนุภาคนาโนของเงิน (A) และ มีอนุภาคนาโนของเงิน (B)	2
4-1	% Alkalinity ก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์ (LT) และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 พีพีเอ็ม (S-100)	8
4-2	ค่า Mechanical Stability ก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์ (LT) และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 พีพีเอ็ม (S-100)	8
4-3	ค่า Total Solids Content ก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์ (LT) และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 พีพีเอ็ม (S-100)	9
4-4	อนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงินเข้มข้น 75 ppm	9
4-5	การวิเคราะห์อนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์โดยเทคนิค Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ	9
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคนาโนของเงินต่อค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ	10
4-7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นฟิล์มต่อค่าความแข็ง	10
4-8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางต่อค่าความแข็ง	11
4-9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางต่อค่าความแข็ง	11
4-10	กราฟความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงิน ที่ความเข้มข้นในช่วง 0-75 ppm (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)	12
4-11	กราฟความเค้น-ความเครียดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงิน ที่มีความหนา 1.5 และ 1.0 mm ตามลำดับ (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)	12
4-12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที และ 120 °C เป็นเวลา 15 และ 30 นาที	13
4-13	ค่าทนแรงดึงสูงสุดของก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินต่างกัน (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)	13
4-14	ค่าระยะยืดที่จุดขาดของก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ค่าความเข้มข้นอนุภาคนาโนของเงินต่างกัน (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)	14
4-15	ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินต่างกัน (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)	14
4-16	ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินต่างกัน (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)	15

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-17	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเชื้อ <i>S. aureus</i> บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ (ภาวะการวัดค่าในชั้นน้ำยาคอมปาวด์: 120°C 15 นาที)	16
4-18	จำนวนแบคทีเรีย <i>S. aureus</i> บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง	17
4-19	จำนวนเชื้อ <i>S. aureus</i> บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความหนา 1 mm (S100_120_30_T) และ 1.5 mm (S100_120_30) ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ	18
4-20	จำนวนเชื้อ <i>S. aureus</i> และ % Reduction บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้น 75 ppm โดยภาวะการวัดค่าในชั้นน้ำยาคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 15 นาที (S75_105_15), 120°C เป็นเวลา 15 นาที (S75_120_15) และ 120°C เป็นเวลา 30 นาที (S75_120_30) ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ	19
4-21	จำนวนแบคทีเรีย <i>E.coli</i> บนแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงิน ที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ที่เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง (ภาวะการวัดค่าในชั้นน้ำยาคอมปาวด์: 120°C 15 นาที)	20

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

การใช้อนุภาคเงินในการฆ่าเชื้อโรคมีการใช้กันมานานตั้งแต่อดีต เช่น ภาชนะที่ทำจากเงินในการเก็บรักษาอาหารหรือใส่น้ำดื่ม เป็นต้น สืบเนื่องมาจนถึงปัจจุบันเป็นยุคนาโนยังคงมีการพัฒนาการใช้อนุภาคนาโนของเงินเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคให้มากขึ้น โดยได้มีการคิดค้นเทคนิคในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเงินให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรในช่วง 10 ถึง 100 นาโนเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง นอกจากนี้การนำอนุภาคนาโนของเงินมาผสมร่วมกับวัสดุอื่น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุนั้นในเชิงอุตสาหกรรมด้วย

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติบางชนิด เช่น กุ้งมือที่ใช้ในทางการแพทย์ และถุงยางอนามัย เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้แต่ไม่สามารถต้านเชื้อโรบบางชนิดเข้าสู่ร่างกายได้ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจึงมีความจำเป็นและน่าสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในปัจจุบันมีโรคระบาดรุนแรง เช่น ไข้หวัดนกสายพันธุ์ H5N1 และ โรคเอดส์ การออกตรวจและการรักษาของแพทย์และพยาบาลมีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคสูง เพื่อป้องกันบุคลากรเหล่านี้จากผลกระทบในการปฏิบัติงาน หนทางหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหาได้ คือ ศึกษาแนวทางที่จะพัฒนาคุณภาพของกุ้งมือยางธรรมชาติ โดยการทำผสมร่วมกับอนุภาคนาโนของเงิน ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของอนุภาคนาโนของเงินกันอย่างแพร่หลาย พบว่าสมบัติของอนุภาคนาโนของเงินมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้มากกว่าการใช้ยาฆ่าเชื้อโดยทั่ว ๆ ไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งกุ้งมือที่ทำจากน้ำยางธรรมชาติจะมีส่วนของสารที่ไม่ใช่ยาง เช่น โปรตีน ซึ่งอาจเป็นตัวกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ส่งผลให้ผู้สวมใส่หรือสัมผัสเกิดการแพ้ได้ อนุภาคนาโนของเงินมีขนาดเล็กมากจึงเป็นข้อดีในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น จากคุณสมบัตินี้ทำให้ใช้ปริมาณนาโนของเงินจำนวนน้อยแต่สามารถฆ่าเชื้อโรคพวกแบคทีเรีย (Bacteria) ไวรัส (Virus) และฟังไจ (Fungi) ที่มีชีวิตและที่กำลังเจริญเติบโตได้ นอกจากนี้ ข้อดีของการใช้นาโนของเงิน คือ ราคาไม่แพง สามารถป้องกันเชื้อโรคได้ดีทั้งในระยะสั้นและระยะยาว สะดวก และนำมาประยุกต์ใช้ได้ง่าย ไม่เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาหาภาวะและเทคนิคที่เหมาะสมในการผสมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางธรรมชาติ และสามารถขึ้นรูปน้ำยางธรรมชาติให้เป็นแผ่นฟิล์มได้ โดยที่ไม่ทำให้อนุภาคนาโนของเงินเสื่อมสภาพหรือสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง กลุ่มนักวิจัยคาดหวังว่าองค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตกุ้งมือยางในอุตสาหกรรม และยังช่วยลดความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงการทางการแพทย์และสาธารณสุขได้ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

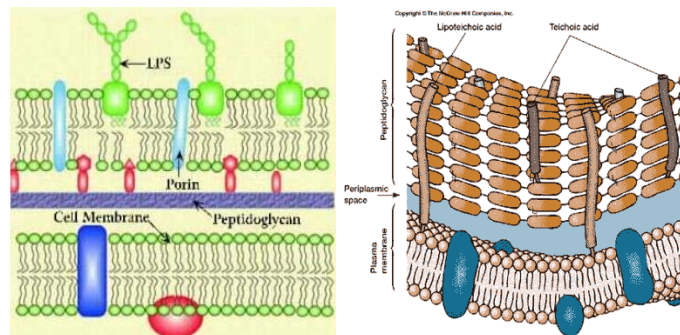
- 1.2.1 หาภาวะที่เหมาะสมในการผสมอนุภาคนาโนของเงินกับน้ำยางธรรมชาติ
- 1.2.2 สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติโดยยังคงรักษาคุณสมบัติในการต้านเชื้อโรคของอนุภาคนาโนของเงินไว้ได้

บทที่ 2

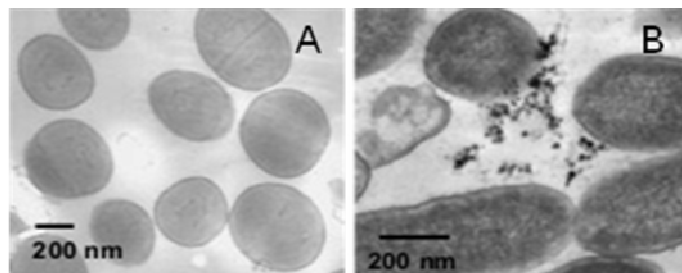
ทฤษฎี แนวคิดในการทำงานวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 อนุภาคนาโนของเงินกับการฆ่าเชื้อโรค [1]

โลหะเงินและสารประกอบของโลหะเงินได้ถูกนำมาใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรคมาแต่โบราณ แต่กลไกในการฆ่าเชือนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด Q. L. Feng และคณะ [2] ได้ทดลองใช้ silver ion (Ag^+) กับแบคทีเรียแกรมบวก *S. aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ *E. coli* พบว่าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่า silver ion จะกระจายอยู่ตามผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรีย และทำให้เกิดการรวมตัว (Condensation) ของดีเอ็นเอภายในเซลล์ ทำให้คาดได้ว่ากลไกในการฆ่าแบคทีเรียของ silver ion คือ silver ion จับกับโปรตีนที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่มีหมู่ thiol (เนื่องจาก silver ion เป็น Soft base จึงสามารถจับกับ Soft acid เช่น กำมะถันและฟอสฟอรัสได้ดี) silver ion ทำให้โปรตีนแปลงสภาพ (Denature) ส่งผลให้การควบคุมการขนส่งสารเข้าและออกจากเซลล์ผิดปกติ silver ion จึงสามารถแทรกเข้าสู่ภายในเซลล์ได้ silver ion ที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์ทำให้ดีเอ็นเอภายในเซลล์ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสจำนวนมากเกิดการรวมตัวและสูญเสียความสามารถในการเพิ่มจำนวน (Replication) แบคทีเรียจึงไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ และ silver ion ที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์ยังสามารถจับกับโปรตีนที่สำคัญอื่น ๆ อีก เช่น โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหายใจระดับเซลล์ เมื่อโปรตีนเหล่านั้นไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ แบคทีเรียก็จะตาย นอกจากนี้การขนส่งสารเข้าออกเซลล์ที่ผิดปกตินี้จะทำให้เซลล์แตก ทำให้แบคทีเรียตายในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2-1 และรูปที่ 2-2 กลไกการทำงานของ silver ion ข้างต้นมีประสิทธิภาพสูงกับแบคทีเรียแกรมลบมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวก เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีชั้น Peptidoglycan ที่บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวก



รูปที่ 2-1 ผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ (A) และ แกรมบวก (B)



รูปที่ 2-2 เซลล์แบคทีเรีย *P. aeruginosa* ที่ไม่มีอนุภาคนาโนของเงิน (A) และ มีอนุภาคนาโนของเงิน (B)

2.2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

Zhang และคณะ [4] ได้เตรียมอนุภาคนาโนของเงินให้กระจายตัวในตัวกลางที่มีรูพรุนของคาร์บอน แอโรเจล (Carbon areogels) โดยทำการแช่แกนนิก แอโรเจล (Organic aerogels) ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต เป็นเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 300-900 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเซชัน (Carbonization) พบว่าการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคนาโนของเงินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ จำนวนอนุภาคของเงิน เวลาในการแช่ และอุณหภูมิของการคาร์บอนเซชัน นอกจากนี้การทดสอบการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่าอนุภาคนาโนของเงินในตัวกลางคาร์บอน แอโรเจล สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ได้

Wang และคณะ [5] ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนของเงินลงในสโกลโลซิลิกาโนสเฟียร์ (Hollow silica nanosphere) และสโกลโลซิลิกาโนทิวบ์ (Hollow silica nanotubes) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 3 ชนิด คือ *E. coli* *S. aureus* และ *Bacillus* โดยใช้วิธีพลทเค้าน์ติง (Plate counting method) พบว่าจำนวนแบคทีเรียโคโลนี (Bacterial colonies) ของ Gram-negative *E. coli* ในทั้งสโกลโลซิลิกาโนสเฟียร์และสโกลโลซิลิกาโนทิวบ์ ถูกทำลายเกือบหมดหลังจากการทดสอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง สำหรับการทดสอบ Gram-positive *S. aureus* จำนวนโคโลนีลดลงเกือบ 100% ทั้งในสโกลโลซิลิกาโนสเฟียร์และสโกลโลซิลิกาโนทิวบ์ หลังจากการทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนการยับยั้งของเชื้อ *Bacillus* อนุภาคนาโนของเงินสามารถยับยั้งเชื้อได้ดีกว่าในสโกลโลซิลิกาโนทิวบ์เมื่อเทียบกับสโกลโลซิลิกาโนสเฟียร์ หลังจากการทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Xu และคณะ [6] ได้เตรียมเส้นใยของพอลิแลคติกแอซิด (Poly(L-lactide): PLA) ที่ผสมด้วยอนุภาคนาโนของเงิน โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของ *E. coli* และ *S. aureus* โดยใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงเชื้อ และนับจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียที่ยังมีชีวิตเหลืออยู่หลังจากการเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 12 ชั่วโมง (เทียบกับสารมาตรฐาน) พบว่าจำนวนเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ในเส้นใยของพอลิแลคติกแอซิดลดลง 94.2% และ 98.5% ตามลำดับ

Mohan และคณะ [7] ศึกษาผลของขนาดอนุภาคนาโนของเงินต่อการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ในร่างแหของไฮโดรเจล (Hydrogel networks) พบว่าอนุภาคนาโนของเงินที่มีขนาด 2.67 ± 0.97 นาโนเมตร สามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนของเงินที่มีขนาด 6.63 ± 2.37 และ 21.11 ± 4.60 ตามลำดับ

ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ต้องการผลิตแผ่นฟิล์มบางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อโรค เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตถุงมือยางในอุตสาหกรรมได้ต่อไป โดยวิธีการตรวจวิเคราะห์เชื้อที่ผู้วิจัยสนใจนำมาใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้คือ คือ การตรวจวิเคราะห์แบบ Film Contact Method [8-11]

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมอนุภาคนาโนของเงิน

อนุภาคนาโนของเงินเตรียมได้โดยปฏิกิริยารีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรด (Silver nitrate: AgNO_3) โดยใช้กลูโคสเป็นตัวรีดิวซ์ และสารละลาย NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นำกลูโคสมาละลายในน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90°C หลังจากนั้นใส่ NaOH 0.02 mol/l ปริมาตร 2 ml (ตัวเร่งปฏิกิริยา) ในสารละลายกลูโคส และตามด้วยสารละลาย AgNO_3 0.001 mol/l ปริมาตร 10 ml หยุดให้ความร้อนเมื่อสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเขียว แสดงว่าไอออนของเงินถูกรีดิวซ์เป็นเงินแล้ว นำอนุภาคนาโนของเงินที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ นำมาผสมกับน้ำยางในขั้นตอนต่อไป

3.2 วิธีการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

- I. น้ำยางคอมปาวด์ถูกเตรียมขึ้นโดยนำน้ำยางธรรมชาติผสมร่วมกับสารเคมีตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สูตรการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

	Wet weight (g)
60 % High ammonia (HA) latex	167
20% Potassium laurate	0.5
10% Potassium hydroxide	2.5
50% Sulfur dispersion	1.4
50% Zinc diethyl dithiocarbamate (ZDEC) dispersion	2.0
50% Antioxidant (Wingstay L) dispersion	2.0
50% Zinc oxide (ZnO) dispersion	1.4
Nanosilver (dispersion in water)	5, 10, 20, 50, 75, 100 ppm*

* การคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์แสดงในภาคผนวก

- II. กวนน้ำยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ส่วนผสมอย่างทั่วถึงโดยไม่เกิดฟองอากาศ
- III. หลังจากนั้นเปิดเครื่องกวนและบ่มน้ำยางคอมปาวด์ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- IV. ทดสอบน้ำยางคอมปาวด์ที่ได้ด้วยคลอโรฟอร์มในอัตราส่วน 1:1 เมื่อคั่งยางแล้วฉีกขาดง่าย แสดงว่าบ่มได้ที่แล้ว แต่ถ้ายางยังเหนียวอยู่ให้บ่มต่อจนกระทั่งยางฉีกขาดง่าย

3.3 วิธีการทดสอบน้ำยางคอมปาวด์

3.3.1 การทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (Determination of Total Solid Content)

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง หมายถึง ปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยางรวมกับสารอื่น ๆ ที่เป็นของแข็งและไม่ใช่น้ำ ซึ่งจะคงเหลือเป็นฟิล์มยางภายหลังจากทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิทดสอบและบรรยากาศที่กำหนด การทดสอบดังกล่าวอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 124 : Latex, rubber – Determination of total solids content ทดลองโดยนำ

แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติไปอบที่อุณหภูมิ $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จนแผ่นฟิล์มยางใส นํ้าออกจากตัวอบ ทำให้เย็นในโอแก้วดูความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนัก

3.3.2 การทดสอบความเป็นด่าง (Determination of Alkalinity)

ความเป็นด่างของนํ้ายาง หมายถึง ปริมาณด่างอิสระทั้งหมดในนํ้ายาง แสดงเป็นปริมาณแอมโมเนียเพราะส่วนใหญ่จะรักษาสภาพนํ้ายางด้วยแอมโมเนีย การทดสอบทำตามมาตรฐาน ISO 125 – 1990 Natural rubber latex concentrate – Determination of Alkalinity และ ISO 976 – 1996 Rubber and plastics–Polymer dispersions and rubber lattices – Determination of pH โดยมีหลักการ คือ ไดเตรตนํ้ายางที่เติมสารช่วยนํ้ายางคงตัวด้วยกรด ให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่างระดับ 6 สังเกตจุดยุติ โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง โดยจุ่มอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายตัวอย่างทดสอบ ใช้เครื่องกวนแบบแม่เหล็กตลอดเวลาขณะเติมสารละลายมาตรฐานกรดกํามะถันหรือกรดเกลือจากบิวเรต จนค่าความเป็นด่างลดลงถึงระดับ 6.0 ± 0.05 เป็นจุดยุติ บันทึกปริมาตรกรดที่ใช้

3.3.3 การทดสอบความคงตัวเชิงกล (Determination of Mechanical Stability)

ความคงตัวของนํ้ายางเชิงกล หมายถึง ความเสถียรของนํ้ายางต่ออิทธิพลทางกล คือ การปั่นกวนนํ้ายางภายใต้สถานะที่ควบคุม ซึ่งเมื่อนํ้ายางเสียความคงตัวอนุภาคยางจะเริ่มจับตัวเป็นก้อนหรือจับตัวเป็นเม็ดละเอียด การทดสอบทำตามมาตรฐาน ISO 35: 1995 Latex rubber, natural, concentrate – Determination of mechanical stability โดยเจือจางตัวอย่างทดสอบให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 55 (m/m) ใช้เครื่องกวนความเร็วสูง บันทึกเวลาเมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มจับตัวเป็นเม็ด

3.3.4 การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในนํ้ายางคอมปาวด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM)

นํ้ายางคอมปาวด์ที่ผสมอนุภาคนาโนของเงินเจือจางด้วยนํ้ากลั่น 400 เท่า หยดตัวอย่างลงบนแผ่น Cu-grid ตั้งทิ้งไว้จนแห้งสนิท นำตัวอย่างไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ยี่ห้อ KEOL รุ่น JEM-2100 ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 120 kV ทดสอบที่อุณหภูมิห้องประมาณ 27°C บันทึกภาพที่สังเกตเห็นได้

3.4 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยาง

นํ้ายางคอมปาวด์ที่ต้องการขึ้นรูปมากรองเพื่อแยกสิ่งเจือปนออก ชั่งน้ำหนักประมาณ 25-30 กรัม เทลงในแม่พิมพ์กระจกขนาด 15×15 cm ให้ได้ความหนาของแผ่นฟิล์มประมาณ 1 มิลลิเมตร เคลือบให้ความหนาของนํ้ายางธรรมชาติเท่ากันหมดทั้งแผ่น ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง สังเกตจนกระทั่งนํ้ายางแห้งและร้อนออกมาจากขอบกระจก นำไปอบเพื่อวัดคาบในชั่งที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตาราง 3-2 ตารางแสดงชั้นงาน

Sample code	Chemical reagent (Wet weight (g))								Curing	Curing	Thickness (mm)
	60 % HA	20% Potassium	10% Potassium	50% Sulfur	50% ZDEC ¹	50% Wingstay L ²	50% ZnO ³	Ag (ppm)	temperature	time	
	Latex	Laurate	Hydroxide	Dispersion					(°C)	(min)	
NR-1	-	-	-	-	-	-	-	-	120	30	-
NR-2	-	-	-	-	-	-	-	-	120	30	-
NR-3	-	-	-	-	-	-	-	-	120	30	-
LT-1	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	-	120	30	1.5
LT-2	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	-	120	30	1.5
S5	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	5	120	30	1.5
S10	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	10	120	30	1.5
S20	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	20	120	30	1.5
S50	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	50	120	30	1.5
S75	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	75	120	30	1.5
S100	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	100	120	30	1.5
S150	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	150	120	30	1.5
LT_105_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	-	105	15	1.5
LT_105_60	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	-	105	60	1.5
LT_120_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	-	120	15	1.5
S5_120_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	5	120	15	1.5
S10_120_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	10	120	15	1.5
S20_120_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	20	120	15	1.5
S50_120_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	50	120	15	1.5
S75_120_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	75	120	15	1.5
S100_T	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	100	120	30	1.0
S150_120_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	150	120	15	1.5
S10_105_30	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	10	105	30	1.5
S10_105_60	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	10	105	60	1.5
S75_105_15	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	75	105	15	1.5
S75_105_30	167	0.5	2.5	1.4	2.0	2.0	1.4	75	105	30	1.5

¹ Zinc diethyl dithiocarbamate dispersion, ² Antioxidant dispersion, ³ Zinc oxide dispersion

3.5 การทดสอบแผ่นฟิล์มยาง

ฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้หลังจากการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว นำมาทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ดังนี้

3.5.1 การทดสอบการทนต่อการดึงยืด (Tensile) ของแผ่นฟิล์มยาง

เตรียมแผ่นฟิล์มยางเป็นรูปคัมเบลตามขนาดมาตรฐาน ASTM-D412 จำนวน 4 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง วัดช่วงของเกจ 2.5 เซนติเมตรเพื่อกำหนดตำแหน่งที่จะวัดความหนาจำนวน 3 ตำแหน่ง ของแต่ละชิ้นทดสอบ วัดค่าความหนาโดยใช้ไมโครมิเตอร์ บันทึกค่าที่วัดได้พร้อมหาค่าเฉลี่ย ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR 5 K ทดสอบที่อุณหภูมิห้องประมาณ 27 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วในการดึง 500 mm/min

3.5.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness) ของแผ่นฟิล์มยาง

เตรียมแผ่นฟิล์มยางที่มีขนาด 5×5 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร โดยนำแผ่นฟิล์มมาซ้อนทับกันให้ได้ความหนา 6 มิลลิเมตร (ประมาณ 5 แผ่น) ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ทดสอบค่าความแข็งโดยเครื่อง Durometer ตั้งระยะห่างประมาณ 1/8 mm ปลดปล่อยหัว Durometer ลงบนชิ้นงาน แล้วจับเวลา 5 วินาที เปลี่ยนจุดที่ใช้วัด 5 จุด ทำ 3 ซ้ำต่อหนึ่งตัวอย่าง และนำค่ามาหาค่าเฉลี่ย

3.5.3 การทดสอบสมบัติก่อนและหลังให้ความร้อน (Aging) ของแผ่นฟิล์มยาง

ก่อนบ่มเร่ง: นำแผ่นฟิล์มยางมาตัดเป็นรูปคัมเบลแล้วนำไปวัดความหนาเฉลี่ย 3 จุด แล้วนำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบ Instron รุ่น 072 ทำซ้ำ 3 ชิ้นงานและหาค่าเฉลี่ย

หลังบ่มเร่ง: นำแผ่นฟิล์มยางไปอบเร่งโดยใช้เครื่อง Hot air oven ยี่ห้อ WTD BINDER รุ่น FD-400 ที่ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มยางหลังบ่มเร่งมาทดสอบเช่นเดียวกับก่อนบ่มเร่ง

3.5.4 การทดสอบ Antimicrobial activity โดย Film Contact Method

i. การทำเตรียมตัวอย่าง

ตัดตัวอย่างให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ หรือให้มีพื้นที่ประมาณ 400 ถึง 600 mm^2 ใช้ตัวอย่าง untreat จำนวน 6 ชิ้น โดยนับจำนวนแบคทีเรียทันทีที่ลงเชื้อเสร็จ 3 ชิ้น และนับที่ 24 ชม. อีก 3 ชิ้น และใช้ antimicrobial test sample จำนวน 3 ชิ้น นับเชื้อที่ 24 ชม. แล้วทำให้ปลอดเชื้อโดยการ autoclave และทำความสะอาดตัวอย่างโดยเช็ดผิวทุกด้านด้วย 70% ethanol

ii. การทดสอบ

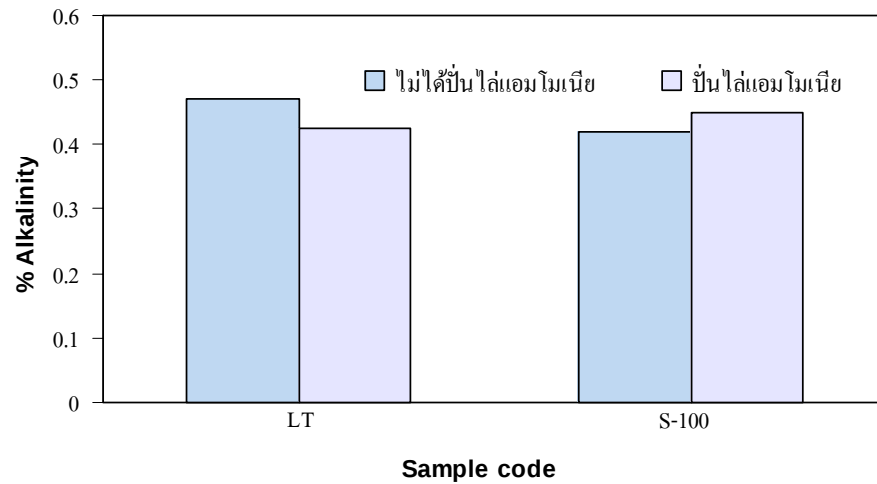
เจือจาง NB medium ด้วย deionized water 500 เท่า ปรับ pH ให้เป็น 6.8-7.2 เชื้อเชื้อแบคทีเรียจาก slant ลงในอาหาร NB เจือจาง 1 ml ให้ได้ความเข้มข้น 10^6 cell/ml คูลสารละลายเชื้อปริมาตร 0.1 ml ลงบนตัวอย่าง ปิดทับตัวอย่างด้วยแผ่นฟิล์ม บ่มที่ 35°C โดยให้มีความชื้นในที่บ่ม ให้ recover เอาแบคทีเรียออกทันทีหลังจากลงเชื้อเสร็จ และทำที่ 24 ชม. อีก 3 ชิ้น การ recover แบคทีเรียจากชิ้นตัวอย่าง antimicrobial ก็ทำเช่นเดียวกัน แต่ทำหลังจากบ่มแล้ว 24 ชม. นับเชื้อเป็นโคโลนีที่เหลืออยู่

บทที่ 4

ผลการวิจัย

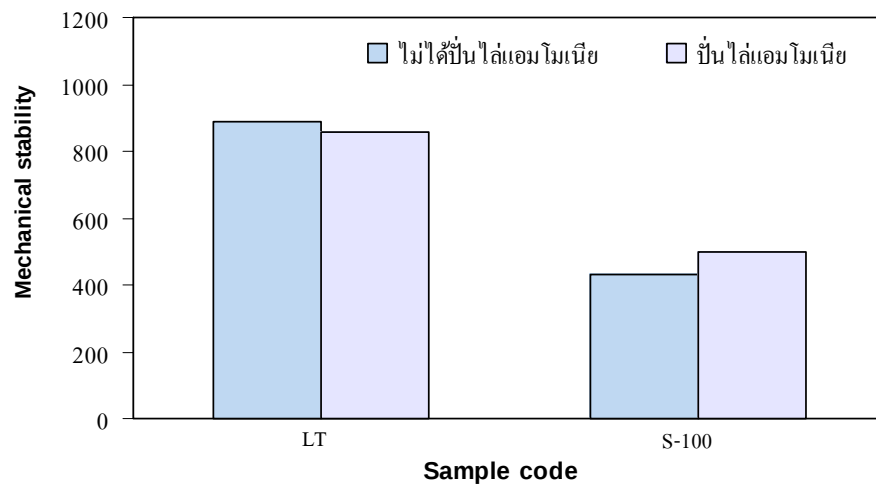
4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของน้ำยางคอมปาวด์

4.1.1 % Alkalinity



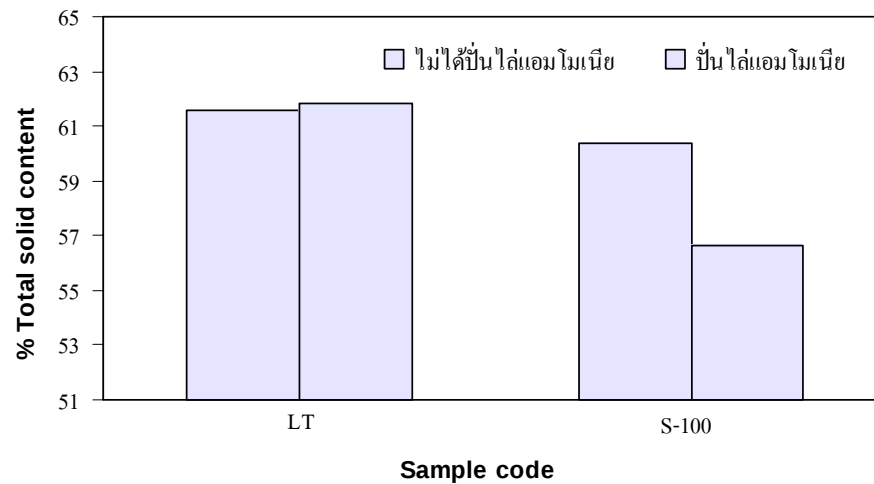
รูปที่ 4-1 % Alkalinity ก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์ (LT) และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 พีพีเอ็ม (S100)

4.1.2 Mechanical Stability (MST)



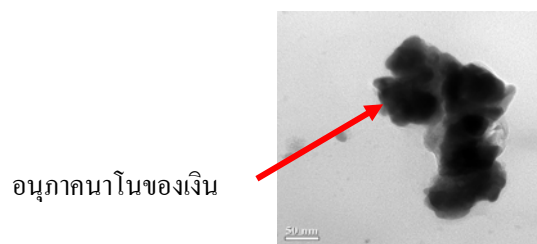
รูปที่ 4-2 ค่า Mechanical Stability ก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์ (LT) และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 พีพีเอ็ม (S-100)

4.1.3 % Total solid content (% TSC)

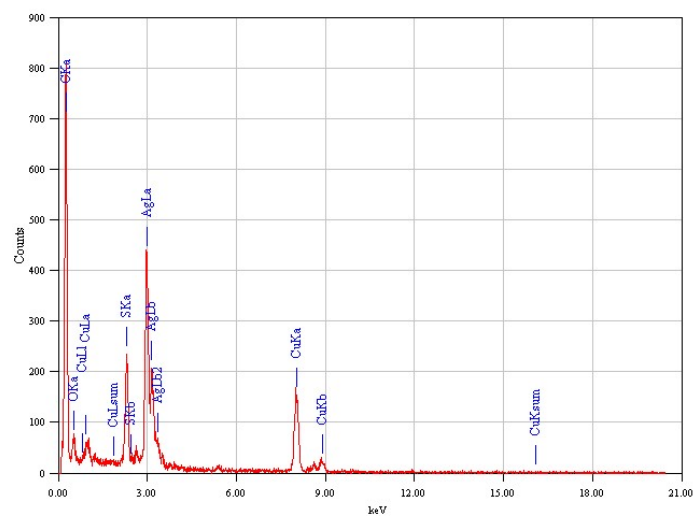


รูปที่ 4-3 ค่า Total Solid Content ก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์ (LT) และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 พีพีเอ็ม (S-100)

4.1.4 การกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



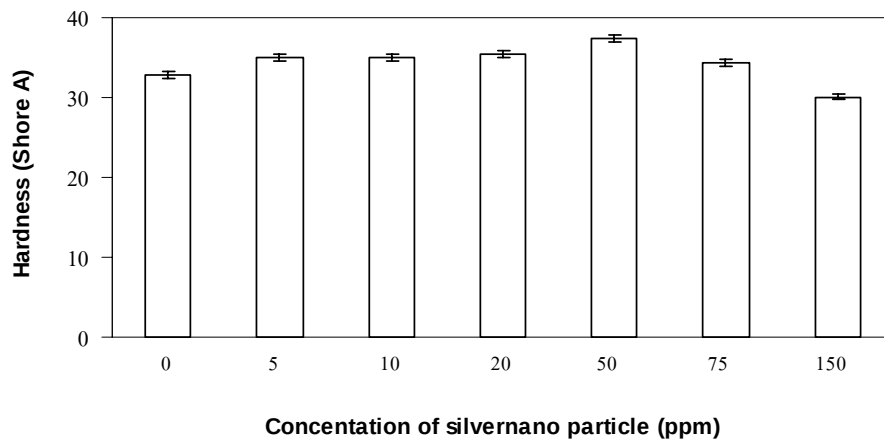
รูปที่ 4-4 อนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงินเข้มข้น 75 ppm โดยเครื่อง Transmission Electron Microscopy



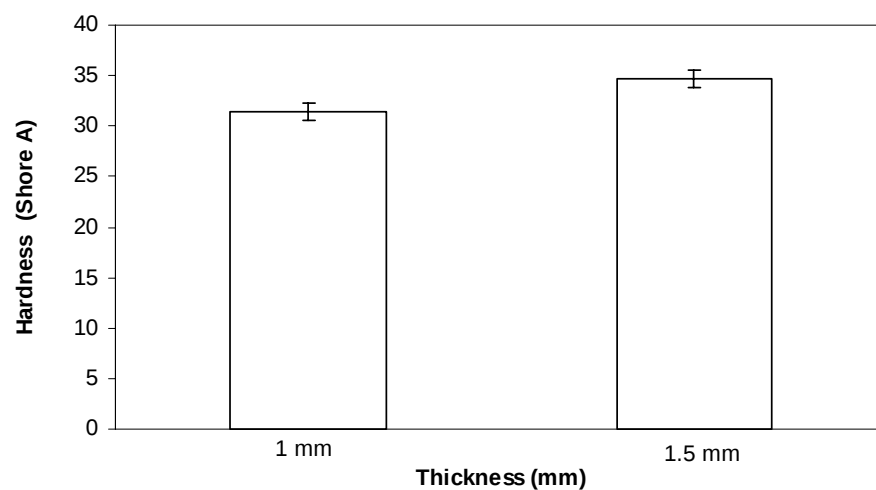
รูปที่ 4-5 การวิเคราะห์อนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์โดยเทคนิค Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS)

4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยาง

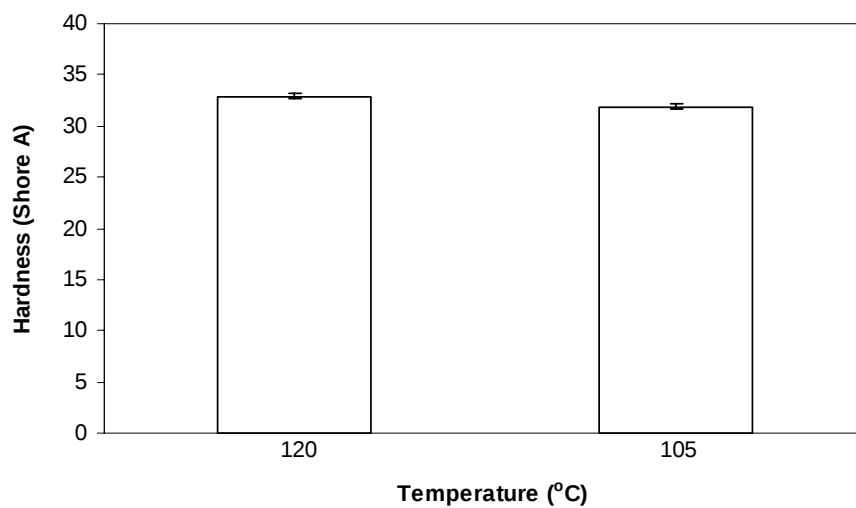
4.2.1 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness)



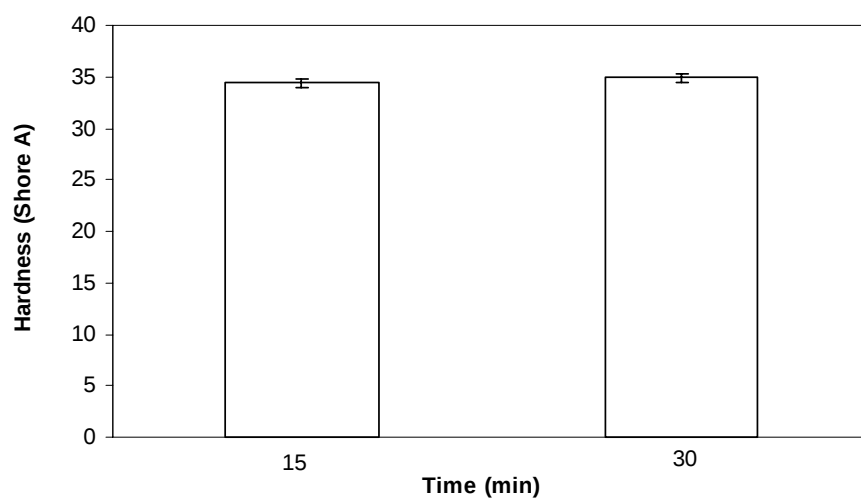
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคนาโนของเงินต่อค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 15 นาที)



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติต่อค่าความแข็ง (แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน 100 ppm ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)



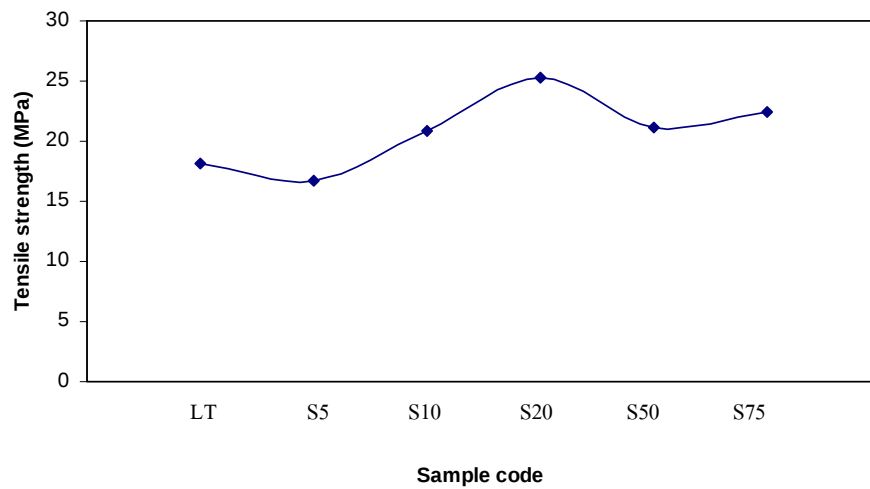
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติต่อค่าความแข็ง (แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน 75 ppm ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 15 นาที)



รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติต่อค่าความแข็ง (แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน 150 ppm ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C)

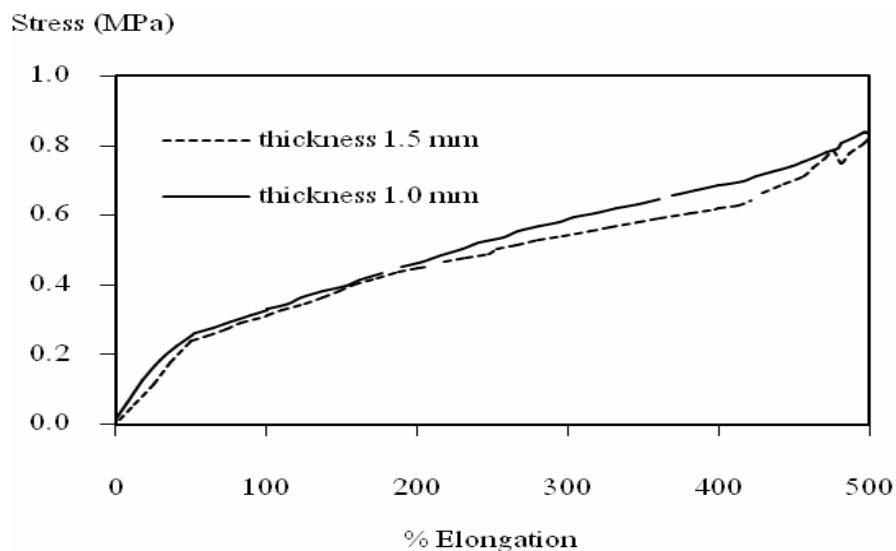
4.2.2 การทดสอบค่าความทนแรงดึง (Tensile properties)

4.2.2.1 ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินต่อการทนต่อการดึงยืด



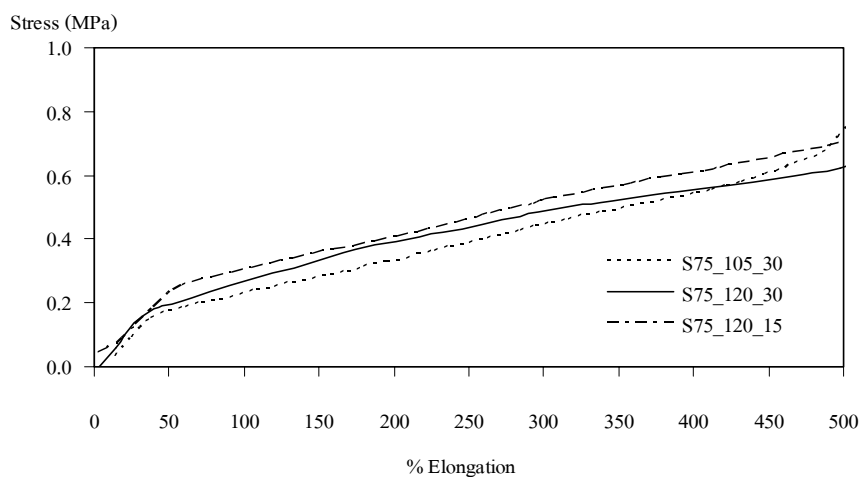
รูปที่ 4-10 กราฟความทนต่อแรงดึงสูงสุดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่ความเข้มข้นในช่วง 0-75 ppm (ภาวะการวัดคาบในชั้นน้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)

4.2.2.2 ผลของความหนาของแผ่นฟิล์มยางต่อการทนต่อการดึงยืด



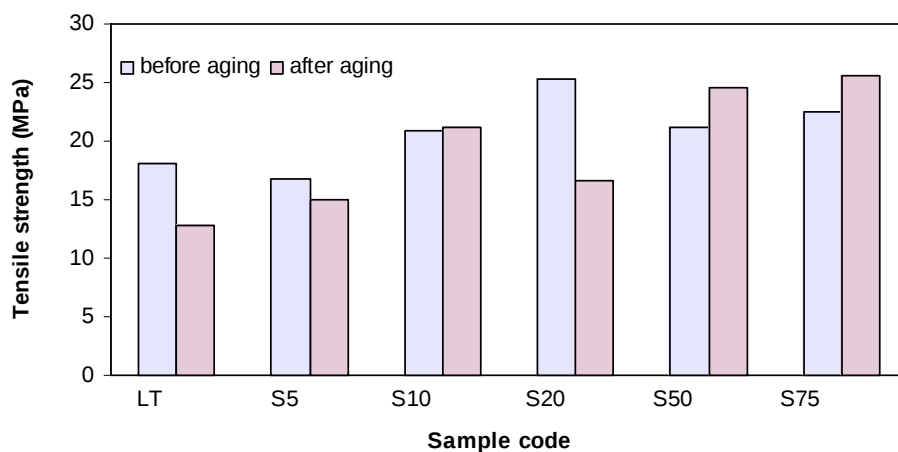
รูปที่ 4-11 กราฟความเค้น-ความเครียดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 ppm ที่มีความหนา 1.5 และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ภาวะการวัดคาบในชั้นน้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)

4.2.2.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางต่อการทนต่อการดึงยึด

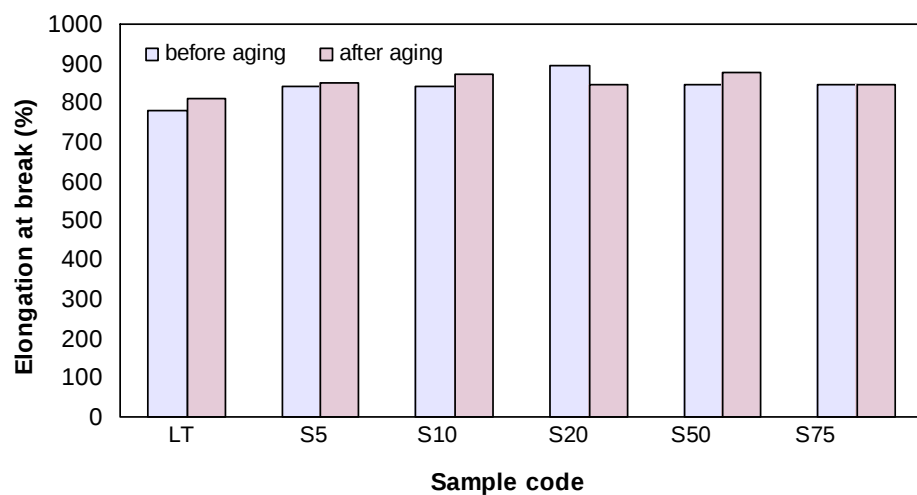


รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงิน ทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 30 นาที และ 120°C เป็นเวลา 15 และ 30 นาที ตามลำดับ

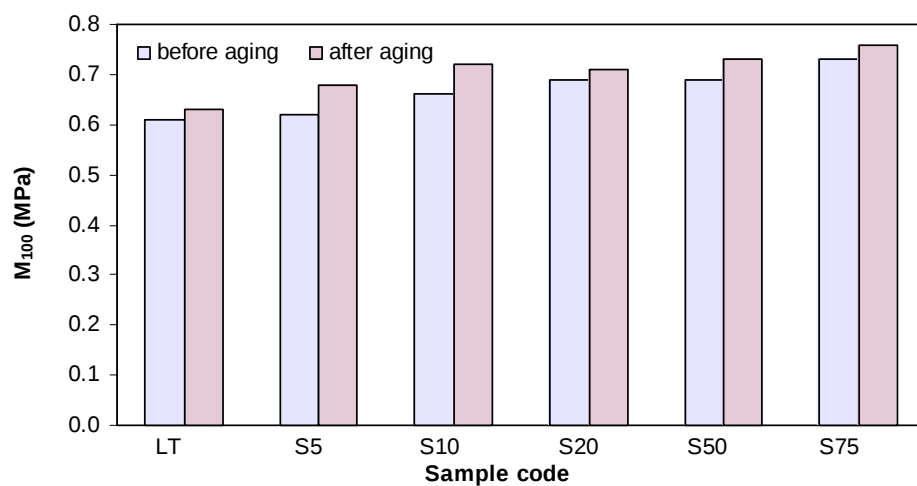
4.2.3 การทดสอบการเสื่อมสภาพ (Aging) ของแผ่นฟิล์ม



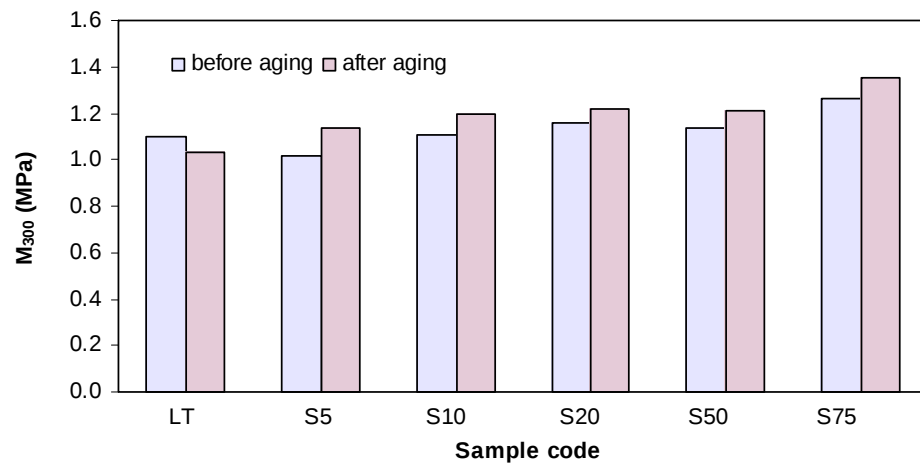
รูปที่ 4-13 ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุดของก่อนและหลังบ่มเร่งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินต่างกัน (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)



รูปที่ 4-14 ค่าระยะยืดที่จุดขาดของก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางที่ค่าความเข้มข้นอนุภาคนาโนของเงินต่างกัน (ภาวะการวัดคาในชั้นน้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)



รูปที่ 4-15 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงินต่างกัน (ภาวะการวัดคาในชั้นน้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)



รูปที่ 4-16 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงินต่างกัน (ภาวะการวัดค่าในชั้นน้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที)

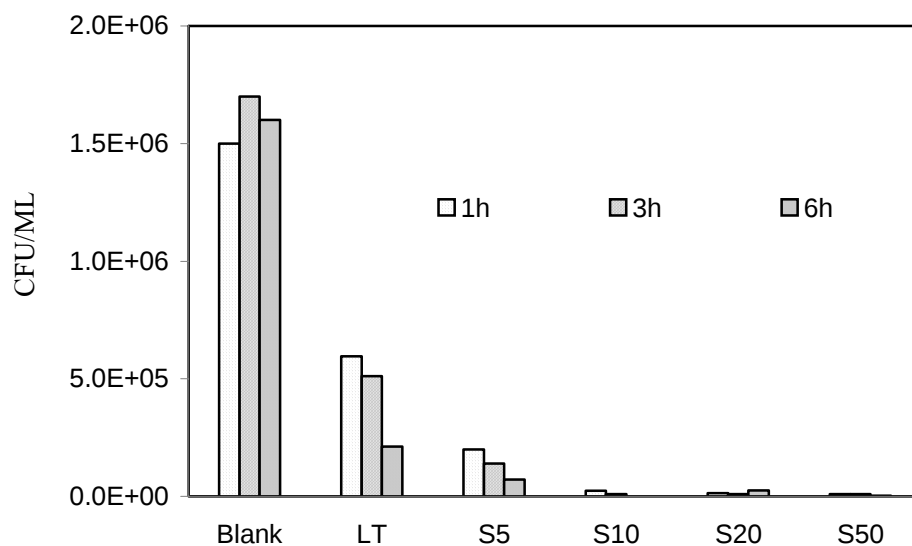
4.2.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ

4.2.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของ *S. aureus*

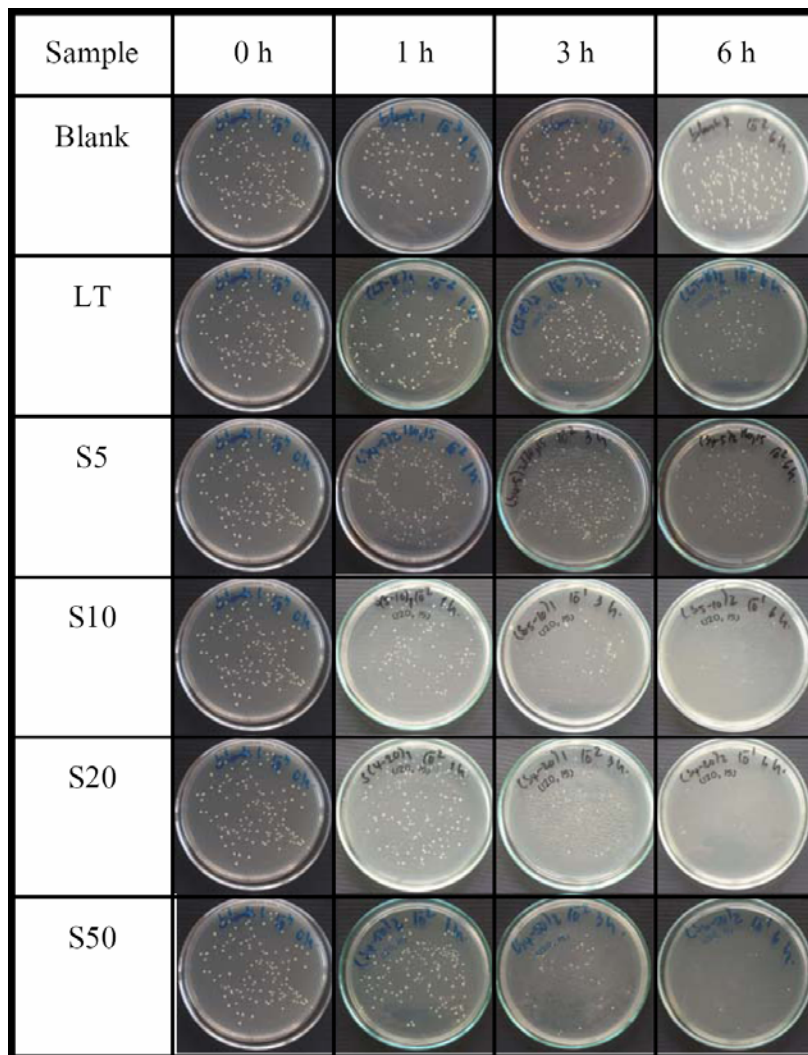
- ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินบนแผ่นฟิล์มยาง

ตารางที่ 4-1 จำนวนแบคทีเรีย *S. aureus* และ % Reduction ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ

Sample	CFU/ML				% Reduction		
	0 h	1 h	3 h	6 h	1 h	3 h	6 h
Blank	2.0×10^6	1.5×10^6	1.7×10^6	1.6×10^6	25	15	20
LT	2.0×10^6	5.7×10^5	5.1×10^5	2.1×10^5	70	74	89
S5	2.0×10^6	2.0×10^5	1.4×10^5	7.2×10^4	90	92	96
S10	2.0×10^6	2.5×10^4	1.0×10^4	< 10	99	99	~100
S20	2.0×10^6	1.4×10^4	1.0×10^4	2.6×10^4	99	99	99
S50	2.0×10^6	1.4×10^4	1.0×10^4	2.1×10^3	99	99	~100



รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเชื้อ *S. aureus* บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ (ภาวะการวัดค่าในชั้นน้ำยางคอมปาวด์: 120°C 15 นาที)

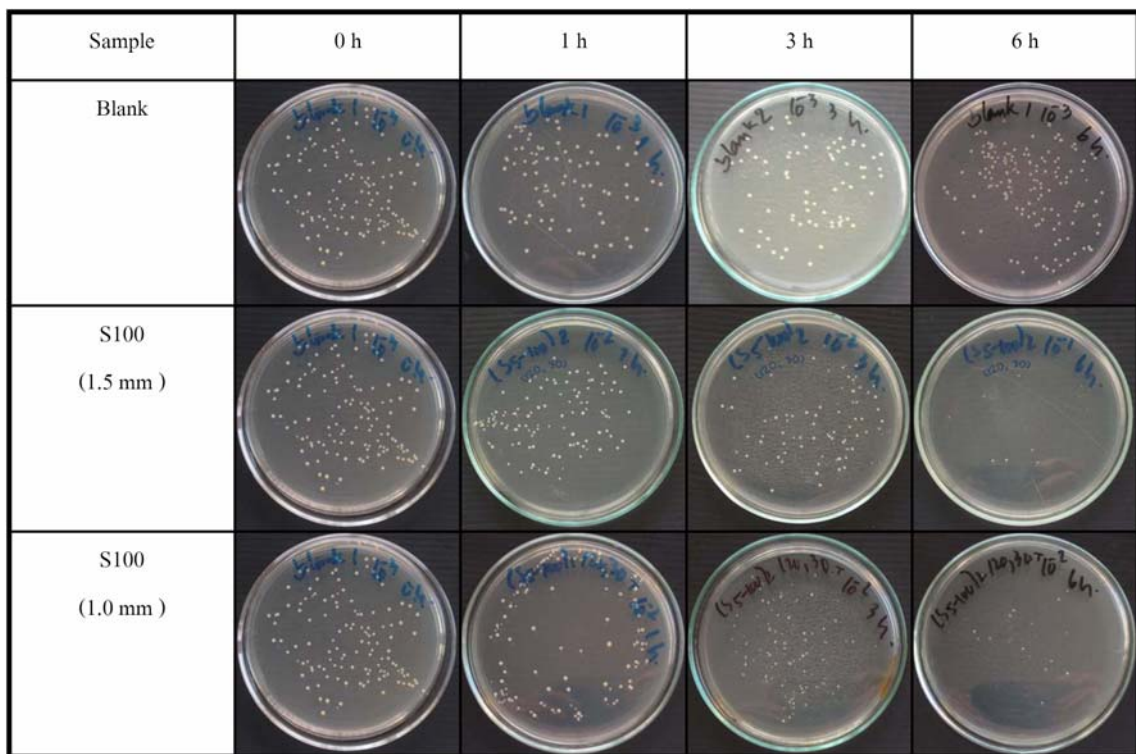


รูปที่ 4-18 จำนวนแบคทีเรีย *S. aureus* บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง

● ผลของความหนาของแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงิน

ตารางที่ 4-2 จำนวนเชื้อ *S. aureus* และ % Reduction บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความหนา 1 mm (S100_120_30_T) และ 1.5 mm (S100_120_30) ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ (ภาวะการวัดคาบในน้ำยาฆ่าเชื้อ: 120°C 30 นาที)

Sample	CFU/ML				% Reduction		
	0 h	1 h	3 h	6 h	1 h	3 h	6 h
Blank	2.0×10^6	1.5×10^6	1.7×10^6	1.6×10^6	25	15	20
S100_120_30	2.0×10^6	3.7×10^5	3.2×10^5	1.5×10^4	80	84	99
S100_120_30_T	2.0×10^6	1.8×10^5	1.6×10^5	6.1×10^4	92	92	97

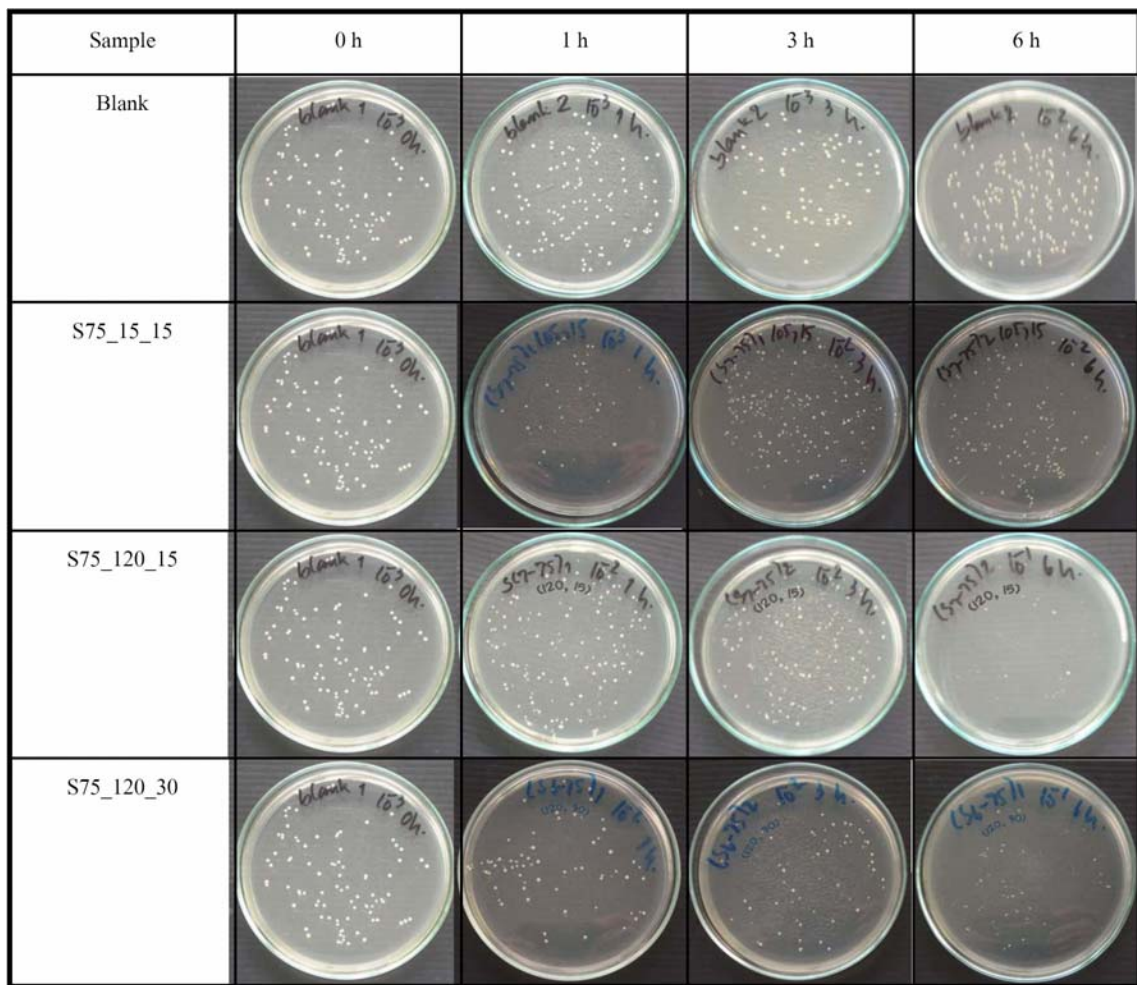


รูปที่ 4-19 จำนวนเชื้อ *S. aureus* บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความหนา 1 mm (S100_120_30_T) และ 1.5 mm (S100_120_30) ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ

● ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่มยาง

ตารางที่ 4-3 จำนวนเชื้อ *S. aureus* และ % Reduction บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้น 75 ppm โดยภาวะการวัดค่าในชั้นน้ำยางคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 15 นาที (S75_105_15), 120°C เป็นเวลา 15 นาที (S75_120_15) และ 120°C เป็นเวลา 30 นาที (S75_120_30) ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ

Sample	CFU/ML				% Reduction		
	0 h	1 h	3 h	6 h	1 h	3 h	6 h
Blank	2.0×10^6	1.5×10^6	1.7×10^6	1.6×10^6	25	15	20
S75_105_15	2.0×10^6	4.9×10^5	2.6×10^5	9.9×10^4	76	87	95
S75_120_15	2.0×10^6	4.9×10^5	3.4×10^5	3.4×10^4	76	83	99
S75_120_30	2.0×10^6	2.0×10^5	2.8×10^5	3.7×10^4	90	86	98

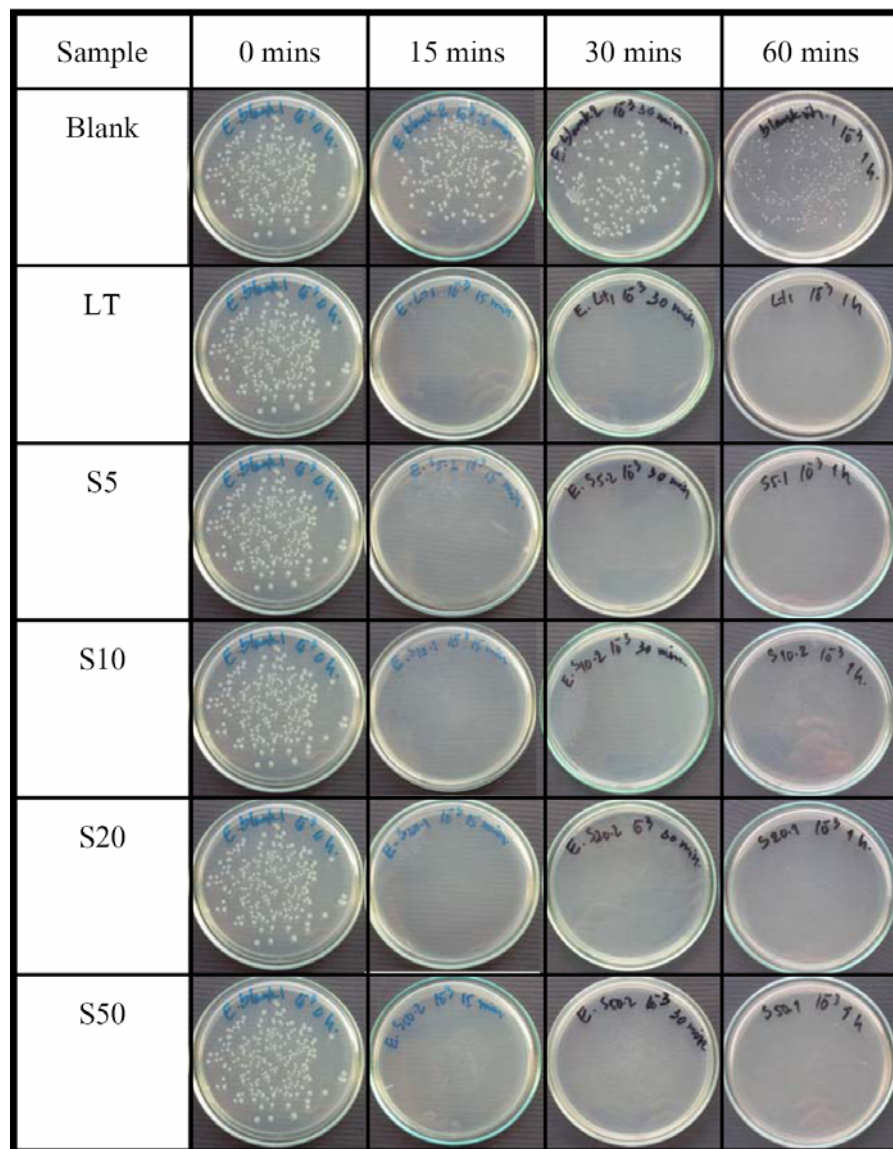


รูปที่ 4-20 จำนวนเชื้อ *S. aureus* บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้น 75 ppm โดยภาวะการวัดค่าในชั้นน้ำยางคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 15 นาที (S75_105_15), 120°C เป็นเวลา 15 นาที (S75_120_15) และ 120°C เป็นเวลา 30 นาที (S75_120_30) ณ เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ

4.2.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของ *E. coli*

ตารางที่ 4-4 จำนวนแบคทีเรีย *E. coli* และ % Reduction บนแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที (ภาวะการวัดค่าในชั้นน้ำยางคอมปาวด์: 120°C 15 นาที)

Sample	CFU/ML				% Reduction		
	0 min	15 mins	30 mins	60 mins	15 mins	30 mins	60 mins
Blank	1.8×10^6	1.7×10^5	1.1×10^6	1.8×10^6	91	39	0
LT	1.8×10^6	$< 10^3$	$< 10^3$	$< 10^3$	~100	~100	~100
S5	1.8×10^6	$< 10^3$	$< 10^3$	$< 10^3$	~100	~100	~100
S10	1.8×10^6	$< 10^3$	$< 10^3$	$< 10^3$	~100	~100	~100
S20	1.8×10^6	$< 10^3$	$< 10^3$	$< 10^3$	~100	~100	~100
S50	1.8×10^6	$< 10^3$	$< 10^3$	$< 10^3$	~100	~100	~100



รูปที่ 4-21 จำนวนแบคทีเรีย *E. coli* บนแผ่นฟิล์มของผสมอนุภาคนาโนของเงิน ที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที (ภาวะการวัดคาน้ำยาล้างจาน: 120°C 15 นาที)

บทที่ 5

วิจารณ์ผล

5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของน้ำยางคอมปาวด์

การทดสอบสมบัติเชิงกลของน้ำยางคอมปาวด์เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลังการเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์จะส่งผลต่อการจับตัวของน้ำยางคอมปาวด์หรือไม่อย่างไร นอกจากนี้ศึกษาผลของแอมโมเนียต่อการจับตัวของน้ำยางเนื่องจากในน้ำยางถ้ามียุพันธ์แอมโมเนียสูง การรวมตัวกันของน้ำยางจะเกิดขึ้นยาก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนของเงินและผลของแอมโมเนียต่อการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี ดังนี้

- 1) ไม่ปั่นไล่แอมโมเนียในน้ำยาง ก่อนการผสมเป็นน้ำยางคอมปาวด์
- 2) ปั่นไล่แอมโมเนียในน้ำยาง 2 ชั่วโมง ก่อนการผสมเป็นน้ำยางคอมปาวด์

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของน้ำยางคอมปาวด์ในงานวิจัยนี้อธิบายโดยสรุปในแง่ของเปอร์เซ็นต์อัลคาไลน์ตี (% Alkalinity) ความเสถียรของน้ำยาง (Mechanical stability) และปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง (Total solid content) ได้ดังนี้

5.1.1 % Alkalinity

เป็นการทดสอบค่าความเป็นด่างของน้ำยาง ปริมาณค่าอิสระทั้งหมดในน้ำยาง ซึ่งจะแสดงเป็นปริมาณแอมโมเนีย เพราะส่วนใหญ่ในน้ำยางจะทำการรักษาสภาพน้ำยางไม่ให้จับตัวเป็นก้อนด้วยการเติมแอมโมเนียลงไป

รูปที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบค่า % Alkalinity ก่อนและหลังปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์ (LT) และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนทั้งนี้เนื่องจากของเงิน 100 พีพีเอ็ม (S-100) พบว่าค่า % Alkalinity ของ LT และ S-100 ทั้งก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนียมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางคอมปาวด์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ภาวะที่ทำการปั่นไล่แอมโมเนียในน้ำยางก่อน 2 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณแอมโมเนียไม่สูงจนเกินไปเพื่อความสะดวกต่อการขึ้นรูปของแผ่นฟิล์มยางต่อไป

5.1.2 Mechanical Stability (MST)

เป็นการทดสอบความเสถียรของน้ำยางต่ออิทธิพลทางกล โดยการปั่นกวนน้ำยางภายใต้ภาวะที่ควบคุม (ความเร็ว 14000 รอบ/นาที $\pm$ 200 รอบ/นาที ตลอดการทดสอบ) เมื่อน้ำยางเสียความคงตัวอนุภาคนาโนจะเริ่มจับตัวเป็นก้อนหรือจับตัวเป็นเม็ดละเอียด

รูปที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Mechanical Stability ก่อนและหลังปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 พีพีเอ็ม พบว่าค่า MST ของ LT มีค่าสูงกว่า S-100 ทั้งก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนีย แสดงว่าการเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์ส่งผลให้ค่า MST ลดลงอย่างชัดเจน แม้ว่าค่า MST ของ S-100 จะมีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ LT ซึ่งอาจจะไม่เป็นการดีในการนำไปปฏิบัติในสายการผลิตจริง เพราะมีความเสี่ยงต่อความไม่เสถียรในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งโดยปกติในสายการผลิตจริงจะมีการสัมผัสทั้งความร้อนและการสั่นสะเทือน แต่จากการทดลองพบว่าค่า MST ของ S-100 ที่ลดลงนั้น ไม่ส่งผลให้น้ำยางคอมปาวด์จับตัวกันเป็นก้อน และหลังจากที่นำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มยางที่อุณหภูมิต่าง ๆ (105°C และ 120°C) ก็ไม่พบปัญหาแต่อย่างใด

5.1.3 % Total solid content (% TSC)

คือค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง หรืออีกนัยหนึ่ง คือ ปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยางรวมกับสารอื่น ๆ ที่เป็นของแข็งและไม่ใช่น้ำ ซึ่งจะคงเหลือเป็นฟิล์มยางภายหลังจากทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิทดสอบและบรรยากาศที่กำหนด (105°C $\pm$ 5°C)

รูปที่ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบค่า TSC ก่อนและหลังปั่นไล่แอมโมเนียของน้ำยางคอมปาวด์และน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 พีพีเอ็ม พบว่าค่า % TSC ในน้ำยางคอมปาวด์ที่ผสมอนุภาคนาโนของเงินมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับน้ำยางคอมปาวด์ทั้งก่อนและหลังการปั่นไล่แอมโมเนีย ซึ่งถ้าพิจารณาในแง่ของทฤษฎีเมื่อทำการเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์ ค่าของ % TSC ควรมีค่าสูงขึ้น เพราะปริมาณของแข็งในน้ำยางมีมากขึ้น แต่จากการทดลองพบว่า ผลที่ได้กลับเป็นไปในแนวทางตรงกันข้าม ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องมาจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบโดยอนุภาคนาโนของเงินก่อให้เกิดการจับรวมตัวของน้ำยางอยู่ด้านล่างของภาชนะ ส่งผลให้การตรวจสอบปริมาณเนื้อยางมีแนวโน้มลดลง ค่า % TSC จึงลดลงตามลำดับ วิธีการแก้ไข คือ ก่อนการทดสอบ % TSC ควรกวนน้ำยางให้เข้ากันดีก่อนการเตรียมตัวอย่าง

5.1.4 การกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

รูปที่ 4-4 แสดงอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงินเข้มข้น 75 ppm พบว่าอนุภาคนาโนของเงินสามารถรวมตัวอยู่ภายในน้ำยางคอมปาวด์ได้ โดยบริเวณที่เป็นสีดำแสดงถึงอนุภาคนาโนของเงิน ส่วนสีเทานั้นแสดงให้เห็นส่วนที่เป็นเนื้อยาง เพื่อเป็นการยืนยันว่าบริเวณสีดำแสดงถึงอนุภาคนาโนของเงินที่มีอยู่ในน้ำยางคอมปาวด์ จึงได้ทำการทดสอบโดยใช้เทคนิค Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS) แสดงดังรูปที่ 4-5 พบว่าพีคของ Ag ขึ้นอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง 3 keV และจากกราฟจะเห็นพีคของ Cu บริเวณ 8-9 keV ซึ่งมาจาก Grid ที่ใช้ในการทดสอบ

5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยาง

5.2.1 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness)

ผลกระทบของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ความหนาของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ อุณหภูมิและเวลาในการวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติต่อค่าความแข็ง แสดงดังรูปที่ 4-6 ถึง 4-9 ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ความหนาของแผ่นฟิล์ม อุณหภูมิและเวลาในการวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ พบว่าไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเกิดช่องว่างหรือฟองอากาศระหว่างชั้นของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ต้องนำมาเรียงซ้อนกันเพื่อให้ได้ความหนาถึง 6 มิลลิเมตร

5.2.2 การทดสอบค่าความทนแรงดึง (Tensile properties)

การทดสอบค่าความทนแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันว่าการเติมอนุภาคนาโนของเงินมีผลอย่างไรต่อค่ามอดูลัส (Modulus) ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์ระยะยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ทดสอบ ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงดึง มีดังนี้ ความหนาของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ อุณหภูมิและเวลาในการวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ

5.2.2.1 ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินต่อการทนต่อการดึงยืด

รูปที่ 4-10 แสดงค่าทนแรงดึงสูงสุดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที) พบว่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์ที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าทนต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินเท่ากับ 20 ppm หลังจากนั้นค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง

5.2.2.2 ผลของความหนาของแผ่นฟิล์มยางต่อการทนต่อการดึงยืด

กราฟความเค้น-ความเครียดของแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงิน 100 ppm ที่มีความหนา 1.5 และ 1.0 mm ตามลำดับ (ภาวะการวัลคาไนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 30 นาที) แสดงในรูปที่ 4-11 พบว่าค่ามอดูลัสของ

แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความหนาต่างกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะการดึงยืดเพิ่มขึ้น ความหนาที่แตกต่างกันของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินในช่วงการดึงยืดต่ำ ๆ (0-200%) ค่ามอดูลัสที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่ามอดูลัสเริ่มมีความแตกต่างในระยะยืดที่สูง ๆ (200-500%) เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมพบว่าความหนาของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติไม่มีผลต่อค่าความทนต่อการดึงยืด ดังนั้นในการทดลองนี้เลือกศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร เนื่องจากค่ามอดูลัสของแผ่นฟิล์มยางที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรมีค่าสูงกว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตรเล็กน้อย นอกจากนี้ผู้วิจัยพิจารณาถึงความสามารถในการเตรียมถุงมือยางธรรมชาติที่ใช้ในอุตสาหกรรม สมบัติโดยทั่วไปที่ต้องการก็อยู่บ้างดี แต่ต้องมีสมบัติการทนแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดสูง และข้อดีของการเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติแบบบางนั้น ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินเกิดขึ้นได้ดีกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความหนามาก

5.2.2.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางต่อการทนต่อการดึงยืด

รูปที่ 4-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงินทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 30 นาที และ 120°C เป็นเวลา 15 และ 30 นาที ตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิและเวลาในการวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าการทนต่อการดึงยืดมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ภาวะที่ 120°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาการเกิดวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

5.2.3 การทดสอบการเสื่อมสภาพ (Aging) ของแผ่นฟิล์ม

การทดสอบการเสื่อมสภาพของแผ่นฟิล์มยางเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแผ่นฟิล์มยางก่อนและหลังบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำมาวัดค่าความทนต่อแรงดึง, ระยะยืดที่จุดขาด และมอดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300 % (M_{100} และ M_{300}) แสดงในรูปที่ 4-13 ถึง 4-16 ตามลำดับ รูปที่ 4-13 แสดงค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดก่อนและหลังการบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน พบว่าค่าทนแรงดึงสูงสุดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติก่อนบ่มแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคนาโนของเงินมีความเข้มข้นมากขึ้น และค่าการทนแรงดึงสูงสุดมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินเท่ากับ 20 ppm หลังจากนั้นค่าทนแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาค่าทนแรงดึงสูงสุดหลังการบ่มแรงแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติพบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับในกรณีก่อนบ่มแรง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในกรณี S10 S50 และ S75 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดหลังการบ่มแรงมีแนวโน้มสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าก่อนการบ่มแรง ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุเนื่องมาจากการผิดพลาดจากการเตรียมชิ้นทดสอบ หรืออาจมีสาเหตุเนื่องมาจากแผ่นฟิล์มยาง under cure

รูปที่ 4-14 แสดงค่าระยะยืดที่จุดขาดของก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ค่าความเข้มข้นอนุภาคนาโนของเงินต่าง ๆ กัน พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ระยะยืดที่จุดขาดทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ความเข้มข้นอนุภาคนาโนของเงินต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกัน

รูปที่ 4-15 และ 4-16 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 % (M_{100}) และ 300 % (M_{300}) ของก่อนและหลังบ่มแรงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่ความเข้มข้นต่างกัน พบว่าค่า M_{100} และ M_{300} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินสูงขึ้นทั้งก่อนและหลังบ่มแรง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า M_{100} และ M_{300} พบว่าค่า M_{300} มีค่าสูงกว่า M_{100} นอกจากนี้ค่ามอดูลัสหลังบ่มแรงมีค่าสูงกว่าก่อนบ่มแรงทั้งนี้อาจมีผลเนื่องมาจากภาวะในการวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาทียังไม่เหมาะสม เมื่อให้พลังงานความร้อนแก่แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติในขณะทำการบ่มแรง ส่งผลให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติสามารถเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ในเซชันต่อไปได้

5.2.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ

การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของแผ่นฟิล์มยางที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้คือ Film Contact Method ตามมาตรฐาน JIS Z 2801 โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ แบคทีเรียแกรมบวกของ *S. aureus* และ แบคทีเรียแกรมลบของ *E. coli* ปัจจัยที่ทดสอบ ได้แก่ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ความหนาของแผ่นฟิล์มยาง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการวัดค่าในซ

ผลการวัดค่าประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจะแสดงถึงจำนวนแบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้นและเวลาที่ต้องการทดสอบมีหน่วยเป็นจำนวนโคโลนีต่อปริมาตร (CFU/ML) นอกจากนี้ผลการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นอัตราการลดลงของจำนวนเชื้อแบคทีเรียโดยคิดเป็น % Reduction ดังแสดงในสมการ 5-1

$$\% \text{ Reduction} = \frac{(\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น} - \text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลาทดสอบ})}{\text{จำนวนแบคทีเรียที่เวลาเริ่มต้น}} \times 100 \quad (5-1)$$

5.2.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของ *S. aureus*

- ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินบนแผ่นฟิล์มยาง

ตารางที่ 4-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเชื้อ *S. aureus* และ % Reduction ของ *S. aureus* บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ผสมอนุภาคนาโนของเงินที่เวลา 0, 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อปริมาณอนุภาคนาโนของเงินในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น การยับยั้งเชื้อ *S. aureus* มีแนวโน้มสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มเวลาในการเลี้ยงเชื้อนานขึ้น การยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ก็มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ≥ 10 ppm จะเห็นว่า จำนวนโคโลนีของเชื้อ *S. aureus* ลดลงอย่างมากประมาณ 99% ดังแสดงในรูป 4-17 และ 4-18 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่อนุภาคนาโนของเงินจับกับผิวหน้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียและรบกวนการทำงานของระดับเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น การขนส่งสารเข้าออกและการหายใจ นอกจากนี้อนุภาคนาโนของเงินสามารถแทรกเข้าไปภายในเซลล์แบคทีเรียและจับการสลายที่มีกัมมันต์และฟอสฟอรัสของ DNA ทำให้ไม่สามารถจำลองตัวได้ และมีปริมาณลดลง [2] เมื่อเปรียบเทียบกับถุงมือยางสังเคราะห์ที่ใช้ทดสอบเป็น Blank เทียบกับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนของเงินพบว่า การยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติเกิดขึ้นได้ดีกว่า ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากในยางธรรมชาติมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่สามารถไปช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้บางส่วน ส่วนจำนวนโคโลนีของ *S. aureus* ในถุงมือยางสังเคราะห์ เพิ่มขึ้น-ลดลงโดยไม่เป็นแนวโน้มตามเวลา ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากเชื้อ *S. aureus* ที่เพาะเลี้ยงบางส่วนก็แบ่งเซลล์ทำให้จำนวนเพิ่มขึ้น บางส่วนอ่อนแอจึงตายเอง

- ผลของความหนาของแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงิน

ตารางที่ 4-2 และรูปที่ 4-19 แสดงผลของความหนาต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคบนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน 100 ppm เมื่อเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มที่หนา 1 mm (S100_120_30_T) และ 1.5 mm (S100_120_30) จะเห็นได้ว่าที่เวลาในการเลี้ยงเชื้อ *S. aureus* 1 และ 3 ชั่วโมง ประสิทธิภาพของการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความหนา 1 mm ให้ผลดีกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีความหนา 1.5 mm (ดังแสดงค่าในตารางที่ 4-2) ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติบนแผ่นมีความหนามากเกินไปจะทำให้อนุภาคนาโนของเงินรวมตัวกันตกสู่ด้านล่างในระหว่างการขึ้นรูป นอกจากนี้อนุภาคนาโนของเงินอาจกระจายตัวไม่ดี เมื่อนำมาทำการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจึงทำให้มีความคลาดเคลื่อน จากผลการทดลองข้างต้น พบว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีความหนา 1 mm เหมาะสมกับการนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อต่อไป

- ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่มยาง

ตารางที่ 4-3 และรูปที่ 4-20 แสดงจำนวนเชื้อ *S. aureus* และ % Reduction บนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้น 75 ppm ภาวะการวัดคาโนซ์น้ำยางคอมปาวด์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 15 นาที ให้ % Reduction ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 15 นาที สรุปได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้วัดคาโนซ์ในการทดลองนี้ไม่ส่งผลในการทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนของเงิน นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ที่เวลา 1 และ 3 ชั่วโมง ในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปโดยใช้ อุณหภูมิที่ 120°C เป็นเวลา 30 นาที ให้ % Reduction ที่สูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ทำการวัดคาโนซ์ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 15 นาที จากผลการทดลองแสดงว่าเวลาในการวัดคาโนซ์ส่งผลต่อการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ทั้งนี้เวลาในการวัด คาโนซ์ที่ยาวขึ้น อาจส่งผลให้อนุภาคนาโนของเงินเกิดอันตรกิริยากับเนื้อยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติแตกต่างกันออกไป ซึ่งสมมุติฐานนี้จำเป็นต้องทำการพิสูจน์ต่อไป

5.2.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของ *E. coli*

การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E. coli* เป็นการทดสอบกับแบคทีเรียแกรมลบซึ่งสามารถ เจริญเติบโตในช่วงอุณหภูมิของร่างกายได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมบวก ดังนั้นจึงแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคที่เกิดกับคน ส่วนใหญ่ งานวิจัยจึงทำการทดสอบประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนของเงินในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ จากตารางที่ 4-4 แสดงจำนวนแบคทีเรีย *E. coli* และ % Reduction บนแผ่นฟิล์มยางผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนา โนของเงินต่างกัน ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที (ภาวะการวัดคาโนซ์น้ำยางคอมปาวด์: 120°C 15 นาที) ปรากฏว่าเชื้อ *E. coli* ตายหมดตั้งแต่ที่เวลา 15 นาทีแรกทั้งในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ใส่และไม่ใส่อนุภาคนาโนของเงิน (ดังรูปที่ 4-21) ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจากอนุภาคนาโนของเงินเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยไอออนของเงินที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งเข้าไปจับกับโปรตีนที่ เกี่ยวข้องกับการหายใจระดับเซลล์ นอกจากนี้ยังทำให้การขนส่งสารเข้าออกผิดปกติ ผนังเซลล์แบคทีเรียแตก ส่งผลให้ แบคทีเรียตายในที่สุด [4] นอกจากนี้ *E. coli* เป็นแบคทีเรียแกรมลบมีชั้นชั้น Peptidoglycan ของผนังเซลล์ที่บางกว่าแบคทีเรีย แกรมบวก (*S. aureus*) ทำให้แบคทีเรียชนิดนี้ตายอย่างรวดเร็ว ในกรณีแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่ใส่อนุภาคนาโน ของเงินสามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้ดีนั้น อาจเป็นเพราะในยางธรรมชาติมีสารเจือปนซึ่งสามารถฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้ ถ้าเปรียบเทียบกับ blank ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ไม่มีการยับยั้งเชื้อ *E. coli* แต่อย่างใด แม้เวลาในการทดสอบผ่านไป 1 ชั่วโมง

จากปัจจัยทั้ง 4 ที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ ทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินบนแผ่นฟิล์มยาง เป็นตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการยับยั้งเชื้อมากที่สุด โดยแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ผสมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความ เข้มข้น 10 ppm ความหนา 1 mm ทำการวัดคาโนซ์ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที แสดงสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความทน ต่อแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์ระยะยืดที่จุดขาดที่ดีและมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานการผลิตถุงมือยางในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ การเติมอนุภาคนาโนของเงินที่มีความเข้มข้นอย่างน้อย 10 ppm สามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ของ *S. aureus* และแกรมลบของ *E. coli* ได้สูงสุด คือ สามารถยับยั้งเชื้อได้สูงถึง 99% และประมาณ 100% ภายในเวลา 1 ชม. และ 15 นาที ตามลำดับ

บทที่ 6

สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนของเงินในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดคือ *S. aureus* และ *E. coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 การทดสอบความคงตัวของน้ำยางต่อเครื่องมือกล

6.1.1 การเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์ไม่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงค่า %Alkalinity

6.1.2 การเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์ส่งผลให้การรวมตัวของน้ำยางเกิดได้เร็วขึ้นสังเกตได้จากค่า MST ของน้ำยางคอมปาวด์มีค่าลดลง

6.1.3 การเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในน้ำยางคอมปาวด์ส่งผลให้ค่า % TSC มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณของอนุภาคนาโนของเงินที่เติมลงไปช่วยให้การจับตัวกันของน้ำยางคอมปาวด์เกิดได้เร็วขึ้น (ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการตั้งน้ำยางคอมปาวด์ทิ้งไว้ก่อนนำไปทดสอบ ทำให้เนื้อยางบางส่วนเกิดการตกตะกอนอยู่ด้านล่างของภาชนะเมื่อนำไปทดสอบค่า % TSC ค่าที่วัดได้จึงลดต่ำลง)

จากข้อมูลข้างต้นแสดงว่าการเติมอนุภาคนาโนของเงินส่งผลต่อการจับตัวของน้ำยางคอมปาวด์ทำให้น้ำยางเกิดการจับตัวกันได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำยางคอมปาวด์ที่ผสมอนุภาคนาโนของเงินยังคงมีลักษณะเป็น Colloid อยู่ และสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มยางได้ต่อไปโดยไม่พบปัญหาใด ๆ เกิดขึ้น

6.2 การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

จากการทดลองโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านทดสอบน้ำยางคอมปาวด์ผสมอนุภาคนาโนของเงินจะพบว่าอนุภาคนาโนของเงินที่เติมลงในน้ำยางคอมปาวด์นั้นสามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำยางคอมปาวด์ได้ดี และเทคนิค Energy-dispersive spectroscopy ยืนยันว่าอนุภาคนาโนของเงินที่ผสมอยู่ในน้ำยางคอมปาวด์นั้นมีอยู่จริง สังเกตจาก peak ของ Ag ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน

6.3 การทดสอบค่าความแข็ง

การทดสอบค่าความแข็งโดยใช้เครื่อง Durometer ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติเตรียมขึ้นที่ภาวะแตกต่างกัน ดังนี้ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ความหนาของแผ่นฟิล์มยาง อุณหภูมิและเวลาในการอบวัลคาไนซิง พบว่าค่าความแข็งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติไม่ขึ้นกับตัวแปรดังกล่าวข้างต้น

6.4 การทดสอบค่าความคงตัวต่อแรงดึง

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ คือปัจจัยเรื่องความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงิน ซึ่งที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นแนวโน้มค่าความคงตัวต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินที่ 20 ppm แสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคนาโนของเงินลงในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาตินั้นทำให้แผ่นฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดียิ่งขึ้น ในขณะที่ความหนาของแผ่นฟิล์มยางและภาวะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน ไม่ส่งผลต่อค่าความคงตัวต่อแรงดึงมากนัก

6.5 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Aging properties)

- 6.5.1 ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์ระยะยืดที่จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั้งก่อนและหลังบ่มแรง เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินเพิ่มขึ้น และค่าทั้งสองมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้น 20 ppm หลังจากนั้นค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการเติมอนุภาคนาโนของเงินทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น และอนุภาคนาโนของเงินไม่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อน
- 6.5.2 การเติมอนุภาคนาโนของเงินส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ภาวะหลังบ่มแรงแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ แสดงค่ามอดูลัสที่สูงกว่าก่อนบ่ม ทั้งนี้เนื่องจากผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบวัลคาไนซ์แผ่นฟิล์มยางก่อนการทดสอบอาจยังไม่สมบูรณ์ เมื่อแผ่นฟิล์มยางได้รับความร้อนเพิ่มจากการบ่มแรงจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน ส่งผลให้คุณสมบัติในการทนต่อแรงดึงดียิ่งขึ้น

6.6 การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าภาวะที่ทำให้ผลดีที่สุดต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย คือ แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนของเงินเข้มข้น ≥ 10 ppm ความหนาของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ 1 mm และทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 120 ° C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* ได้สูงถึง 99 % และ ~100 % ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และ 15 นาที ตามลำดับ

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ผสมอนุภาคนาโนของเงินนั้น สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ เช่นค่าทนต่อแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์ระยะยืดที่จุดขาดได้ดีขึ้น นอกจากนี้การผสมอนุภาคนาโนของเงินลงไปบนแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติยังช่วยในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* ได้สูงถึง 99% และ ~100% ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และ 15 นาที ตามลำดับ จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการผลิตถุงมือยางเพื่อใช้ในทางการแพทย์และการสาธารณสุขที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อได้มากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมต่อไป

6.7 ข้อเสนอแนะ

- 6.7.1 จากการทดลองใช้วิธีการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติด้วยแผ่นกระจกส่งผลให้ความหนาของแผ่นฟิล์มยางที่ได้ยังไม่เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตถุงมือยางที่ป้องกันเชื้อโรคได้ ควรมีการศึกษาวิธีการขึ้นรูปโดยการจุ่ม (dipping) เนื่องจากวิธีการนี้สามารถเตรียมแผ่นฟิล์มยางที่มีความบางมาก ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคนาโนของเงินในเนื้อยางธรรมชาติดีขึ้น ซึ่งจะส่งผลดีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ถุงมือยางต่อไป
- 6.7.2 ควรศึกษา stability ของน้ำยางคอมปาวด์สูตรที่ได้คัดเลือกว่าจะอยู่ในภาวะปกติได้นานเพียงใดโดยไม่มีปัญหาต่อกระบวนการการขึ้นรูป
- 6.7.3 ควรเช็คค่า % การจับตัวของน้ำยางมีค่าเท่าไร เพราะแสดงว่าน้ำยางสูญเสียความเสถียร เนื่องจาก MST ลดลงอย่างมาก แสดงว่าอนุภาคนาโนของเงินมีผลต่อความเสถียรของน้ำยาง หรือทำการวัดค่า sludge ที่เกิดขึ้นเป็นกิโลเปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้อาจสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. พร้อมพงศ์ เพียรพินิจธรรม, ชูชาติ ธรรมเจริญ, สอนง เอกสิทธิ์. อนุภาคนาโนของเงินฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้อย่างไร. *หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.
2. Q. L. Feng, J. Wu, G. Q. Chen, F. Z. Cui, T. N. Kim, J. O. Kim. A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Biomed. Mater. Res*, 2000, 52, 662.
3. V. Alta, T. Bechertb, P. Steinrücke, M. Wagener, P. Seidel, E. Dingeldein, E. Domann, R. Schnettler. An in vitro assessment of the antibacterial properties and cytotoxicity of nanoparticulate silver bone cement. *Biomaterials*, 2003, 25, 4383.
4. S. Zhang, R. Fu, D. Wu, W. Xu, Q. Ye, Z. Chen. Preparation and characterization of antibacterial silver-dispersed activated carbon aerogels. *Carbon*, 2004, 42, 3209-3216.
5. H. Wang, X. Qiao, J. Chen, X. Wang, S. Ding. Preparation of silver nanoparticles by chemical reduction method. *Colloid. Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 2005, 256, 111-115.
6. X. Xu, Q. Yang, Y. Wang, H. Yu, X. Chen, X. Jing. Biodegradable electrospun poly(L-lactide) fibers containing antibacterial silver nanoparticles. *Eur. Polym. J.*, 2006, 42, 2081-2087.
7. Y. M. Mohan, K. Lee, T. Premkumar, K. E. Geckeler. Hydrogel networks as nanoreactors: A novel approach to silver nanoparticles for antibacterial applications. *Polymer*, 2007, 48, 158-164.
8. Y. J. Bryson, L. Sweetman, J. D. Connor. Simple sensitive microbioassay for adenine arabinoside and hypoxanthine arabinoside in human plasma. *Antimicrob. Agents Chemother.*, 1978, 14, 909-915.
9. J. M. Kuhajek, S. N. Jeffers, M. Slattery, D. E. Wedge. A rapid microbioassay for discovery of novel fungicides for *Phytophthora* spp. *Phytopathology*, 2003, 93(1), 46-53.
10. S. -I, Fujii, M. Uematsu, S. Yabuki, M. Abo, E. Yoshimura, K. Sato. Microbioassay system for an anti-cancer agent test using animal cells on a microfluidic gradient mixer. *Anal. Sci.*, 2006, 22, 87-90.
11. นายสัตวแพทย์ศศิ เจริญพจน์. ขาสัตว์ตกค้าง ความปลอดภัยทางอาหาร และการคุ้มครองผู้บริโภค. *โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, กรุงเทพฯ* ๑, 2545.

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์

จากสมการ $M_1 V_1 = M_2 V_2$ และ $D = m / V$

เมื่อ M_1 = ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินที่ต้องการเตรียม (พีพีเอ็ม)
 V_1 = ปริมาณน้ำยาง (มิลลิลิตร)
 M_2 = ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินที่มีอยู่ (พีพีเอ็ม)
 V_2 = ปริมาตรของนาโนของเงิน (มิลลิลิตร)
 D = ค่า Specific gravity ของน้ำยางธรรมชาติ (High ammonia) = 0.94
 m = กรัม น้ำยาง (กรัม)
 V = ปริมาตรของน้ำยาง (มิลลิลิตร)

เตรียมน้ำยางธรรมชาติ 150 กรัม ให้มีความเข้มข้นของอนุภาคเงิน 75 พีพีเอ็มโดยเตรียมจากการเจือจางอนุภาคนาโนของเงินเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม สามารถคำนวณหาปริมาตรของอนุภาคนาโนของเงินได้จากสูตรข้างต้น

$$D = m / V$$

$$0.94 = 150 / V$$

$$V = 159.57 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$75 \times 159.57 = 1000 \times V_2$$

$$V_2 = 11.97 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นปริมาตรของอนุภาคนาโนของเงินที่ใช้ คือ 11.97 มิลลิลิตร

คำชี้แจงแก้ไขรายงานฉบับสมบูรณ์
“ฟิล์มยางธรรมชาติเติมด้วยอนุภาคนาโนของเงิน” RDG5050044

1. ให้ระบุคำสำคัญ (keywords) ด้วย

คำตอบ ได้ระบุแล้วลงในส่วนของบทคัดย่อ/abstract: ยางธรรมชาติ (natural rubber), อนุภาคนาโนของเงิน (silver nanoparticle)

2. เขียนบทคัดย่อ/abstract ใหม่ เมื่อแก้ไขเนื้อหาแล้ว

คำตอบ ได้แก้ไขใหม่แล้ว

3. ข้อ 3.1 การเตรียมอนุภาค หลังจาก ion เป็น Ag แล้วทำอย่างไรต่อ

คำตอบ นำอนุภาคนาโนของเงินที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ นำมาผสมกับน้ำยางตามสูตรที่แสดงไว้ในตารางที่ 3-1 ต่อไป ได้เพิ่มเติมรายละเอียดดังกล่าวแล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1

4. ข้อ 3.2 การกวนน้ำยางข้นเลข ๑ ถึง 2 ชั่วโมง ไม่ practical

- ควรแสดงวิธีการเตรียม dispersion ของ nanosilver

คำตอบ อนุภาคนาโนของเงินที่เตรียมได้อยู่ในรูปของการ dispersion ในน้ำอยู่แล้ว

- ค่า TSC ควรเป็นค่าที่รายงานตามตัวเลขที่ได้ ไม่จำเป็นต้องเทียบกับมาตรฐานน้ำยางข้น (การเติม dispersion จะทำให้ TSC ลดลงอยู่แล้ว)

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว โดยมีได้แสดงการเทียบกับค่ามาตรฐานของน้ำยางข้น

- ค่าอื่นๆ ของน้ำยางคอมปาวด์ก็ไม่ควรเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (เป็นมาตรฐานน้ำยางข้น ไม่ใช่ น้ำยาง compound)

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว

5. เพิ่มเติมรายละเอียดของการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ที่ระบุการใช้ Nanosilver มีหน่วยเป็น ppm นั้น based on น้ำยาง/solid/หรืออย่างไร ในขณะที่สารตัวอื่นๆ ระบุเป็น “กรัม” ของ wet weight

คำตอบ เนื่องจากการเตรียม Nanosilver (dispersion in water) ที่ได้จะอยู่ในระดับความเข้มข้นเป็น ppm นอกจากนี้การเติมพวกโลหะที่มีความเข้มข้นสูงอาจส่งผลให้น้ำยางเสียสภาพได้ ดังนั้นนักวิจัยจึงไม่เลือกที่จะเตรียมความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินสูง ส่วนการคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของเงินในน้ำยางคอมปาวด์ได้แสดงในภาคผนวก โดยการคำนวณ based on ปริมาณน้ำยาง

6. ในทุกๆ ที่แห่ง ที่ระบุ “ภาวะการบ่มน้ำยาง: 120°C เป็นเวลา 15 นาที, 30 นาที” นั้น ไม่น่าจะใช่ “การบ่ม-maturation” ที่ปกติทางเทคโนโลยีน้ำยาง จะหมายถึง การบ่มน้ำยางคอมปาวด์ไว้ ณ อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิประมาณ 30 °C คิดว่าที่อุณหภูมิ 120 °C น่าจะเป็นการ cure หรือ vulcanized น้ำยางคอมปาวด์มากกว่า

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว

7. ข้อ 3.5.1 การทดสอบ Tensile ควรวัดที่ยางถูกดึงจนขาด ไม่ใช่ที่ 500% Elongation และความเร็วเป็นความเร็วในการดึง ไม่ใช่ความเร็วในการทดสอบ

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อ 3.5.1

8. กราฟรูปที่ 4-13 ของ S10, S50, S75 หากไม่ผิดพลาดจากการเตรียมขึ้นทดสอบ/จากการวัด ก็น่าจะเป็นเนื่องจากยาง under cure มากกว่า

คำตอบ ได้เพิ่มเติมคำอธิบายตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อ 5.2.3 หน้า 32 บรรทัดที่ 23-25

9. บทที่ 4 ผลการวิจัยควรมีข้อความอธิบายเบื้องต้นแสดงรูป/ตาราง, รูปที่แสดงไม่ชัดเจน รายละเอียดน้อย บางรูปไม่จำเป็น, ตารางที่ 4-1 และ รูป 4-6 ไม่สัมพันธ์กัน

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว โดยการเพิ่มหัวข้อเพื่อให้ง่ายต่อการอ่านรายงานฉบับสมบูรณ์และให้สอดคล้องกับหัวข้อบทที่ 5 ตารางที่มีความซ้ำซ้อนกับรูปได้ถูกตัดทิ้ง และข้อมูลการทดลองทั้งหมดได้ตรวจสอบว่าถูกต้องเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

10. ค่าของ ISO สำหรับ parameter ต่างๆ ที่ refer นั้น เป็นค่ามาตรฐานของน้ำยางขึ้น ไม่ใช่ค่ามาตรฐานของการทำผลิตภัณฑ์ ควรทบทวนข้อความให้ถูกต้องด้วย

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว

11. บทที่ 5 วิจัยผล ไม่เข้าหลักเกณฑ์ทางวิชาการ, เหตุผลไม่สอดคล้อง, สรุปด้วยความเข้าใจผิด

คำตอบ นักวิจัยได้ทำการแก้ไขบทที่ 5 ใหม่ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว

12. ให้ตรวจสอบ บรรทัดที่ 4 จากข้างล่างหน้า 29 อ่านแล้วไม่เข้าใจ

คำตอบ นักวิจัยได้ทำการแก้ไขบทที่ 5 ใหม่ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว

13. หน้า 30; TSC ลดลงน่าจะเป็น error ของการทดสอบ เพราะปกติแนะนำให้กวนน้ำยางให้เข้ากันดีก่อนเตรียมตัวอย่าง

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว ในหน้า 31 ย่อหน้าที่ 1

ค่า MST ลดลง ไม่เป็นการดีในการปฏิบัติจริง เพราะเสี่ยงต่อความไม่เสถียรในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปมากกว่า ปกติในสายการผลิตจริงจะมีการสัมผัสทั้งความร้อน/การกระเทือน จะมั่นใจได้อย่างไรว่าน้ำยางนั้นจะไม่จับตัวไปก่อนการฟอร์มรูปแบบนั้น

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อ 5.1.2 หน้า 30

14. ให้เพิ่มเติมข้อเสนอแนะในตัวรายงานเดิมด้วย และควรเพิ่มข้อเสนอแนะทั้งในรูปบทสรุป/รายงานเต็มคือ

ควรศึกษา stability ของน้ำยางคอมปาวด์สูตรที่ได้คัดเลือกกว่าจะอยู่ในภาวะปกติได้นานเพียงใดโดยไม่มีปัญหาต่อกระบวนการการขึ้นรูป

ข้อเสนอแนะ ควรชี้ว่า % การจับตัวของน้ำยางมีค่าเท่าไร เพราะแสดงว่าน้ำยางสูญเสียความเสถียร เนื่องจาก MST ลดลงอย่างมาก แสดงว่า Ag nano มีผลต่อความเสถียรซึ่งต้องระวัง เป็นตามที่นักวิจัยเข้าใจ TSC ไม่ควรลดและควรเพิ่มแสดงว่า Ag⁺ ไปทำให้น้ำยางสูญเสียความเสถียร TSC จึงลดลง น่าจะวัดว่าเป็น sludge เท่าไรเทียบเป็นกิโลเปอร์เซ็นต์ จะสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

คำตอบ ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้วทั้งในส่วนของบทสรุปและรายงานฉบับสมบูรณ์