

การย้อมสีและการเพิ่มสมบัติต้านแบคทีเรียแก่เส้นด้ายไหมโดยการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์
และไททาเนีย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COLORATION AND ENHANCEMENT OF ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF SILK YARN BY
COATING WITH SILVER AND TITANIA NANOPARTICLES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

ชนิกันต์ มุรรัตน์ : การย้อมสีและการเพิ่มสมบัติต้านแบคทีเรียแก่เส้นด้ายไหมโดยการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย. (COLORATION AND ENHANCEMENT OF ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF SILK YARN BY COATING WITH SILVER AND TITANIA NANOPARTICLES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พรณา สุจริตวรกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในรูปแบบคอลลอยด์หลากสีและหาสถานะที่เหมาะสมในการนำไปย้อมสีและเพิ่มสมบัติต้านแบคทีเรียแก่เส้นด้ายไหม จากนั้นศึกษาผลของการเติมไททาเนียต่อสมบัติต่างๆของเส้นไหม โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเคมีรีดักชัน ที่มีโซเดียมบอโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ และไตรโซเดียมซिटเรตเป็นตัวป้องกันหน้าผลึก {111} ของอนุภาค ซึ่งการเติมปริมาณโซเดียมบอโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ซิลเวอร์คอลลอยด์สีสันทากหลาย เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ได้มีขนาดหรือรูปร่างที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าสถานะที่เหมาะสมต่อการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย คือที่ซิลเวอร์คอลลอยด์มีค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 5 อัตราส่วนระหว่างปริมาณคอลลอยด์ต่อน้ำหนักเส้นด้ายไหมต่อน้ำหนักไททาเนีย (P25) คือ 200:1:0.05 โดยเส้นด้ายไหมถูกแช่ในซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีการเติมไททาเนียเป็นเวลา 45 นาที ณ อุณหภูมิห้อง นำเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียไปผ่านน้ำปราศไออนเพื่อกำจัดอนุภาคส่วนเกิน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเคลือบผิวด้วยกรดพอลิอะคริลิกปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักเส้นด้ายไหม โดยการแช่เส้นด้ายไหมเป็นเวลา 20 นาทีที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30 – 40 องศาเซลเซียส แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากผลการทดลอง พบว่าสามารถย้อมสีเส้นด้ายไหมโดยการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียได้ ซึ่งเส้นด้ายไหมที่เตรียมได้ดังกล่าวมีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli*. และ *S. aureus*. ได้ดีเยี่ยม ทั้งนี้ไททาเนียช่วยส่งเสริมสมบัติการต้านแบคทีเรียและความสามารถในการป้องกันรังสียูวีแก่เส้นด้ายไหมได้ดี นอกจากนี้การเคลือบด้วยกรดพอลิอะคริลิกจะช่วยเพิ่มความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยน้ำและด้วยน้ำสบู่ให้แก่เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6072196923 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: Silver nanoparticles, Titanium dioxide, Antibacterial property

Chanikan Moonrat : COLORATION AND ENHANCEMENT OF ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF SILK YARN BY COATING WITH SILVER AND TITANIA NANOPARTICLES. Advisor: Assoc. Prof. PORNAPA SUJARIDWORAKUN Co-advisor: Asst. Prof. SIRIWAN KITTINAOVARAT

This study aimed at the synthesis of colorful silver colloids and finding the optimal condition for coloring and enhancing the antibacterial properties of the silk yarn. The effect of TiO₂ adding on properties of the silk yarns was also investigated. Silver nanoparticles were synthesized by a chemical reduction method using NaBH₄ as a reducing agent, H₂O₂ as an oxidizing agent, and trisodium citrate as a protecting agent of {111} facets of nanoparticles. Adding the different amounts of NaBH₄ provided colorful silver colloids due to the different morphologies of silver nanoparticles. It was found that the optimal condition for coloring silk yarns was achieved by immersing silk yarn into a silver colloid, which was adjusted the pH value to 5 and added TiO₂ (P25), with a weight ratio of silver colloid to silk yarn to TiO₂ at 200:1:0.05 for 45 minutes at room temperature. The colored silk yarns were rinsed with deionized water and dried at 60°C for 4 hours. Then, the obtained silk yarns, which were coated by silver and TiO₂ nanoparticles, were immersed into the polyacrylic binder solution with 5wt% of the weight of silk yarns for 20 minutes at 30 – 40 °C and cured at 130 °C for 3 minutes. The results showed that the coloration of the silk yarn with silver and TiO₂ nanoparticles could be achieved at room temperature. Moreover, the obtained silk yarns exhibited strong antibacterial activities against *E. coli* and *S. aureus*, and an excellent UV – protection property. It was demonstrated that coating with a polyacrylic binder could improve the colorfastness to washing by fresh and soapy water of the colored silk yarn.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและอบรมสั่งสอน ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย

ขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์การทำวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ทดสอบและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือด้านเอกสารธุรการเป็นอย่างดีตลอดการวิจัย



ชนิกันต์ มุจรินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไหม (Silk).....	4
2.2 อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Silver nanoparticle).....	8
2.3 ไททาเนีย (Titanium dioxide: TiO ₂).....	21
2.4 สารยึดติดพอลิอะคริลิก (Polyacrylic binder).....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์.....	28
3.3 กระบวนการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์.....	29
3.4 กระบวนการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย.....	29

3.5 กระบวนการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยสารยึดติดพอลิอะคริลิก (PCA).....	30
3.6 การวิเคราะห์ผลและทดสอบสมบัติ	30
3.7 แผนผังงานวิจัย	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง	39
4.1 ผลการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน	39
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์	45
4.3 ผลการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีส้น	55
4.4 ผลการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียต่อการย้อมสีและการเพิ่มสมบัติการป้องกันรังสียูวี	64
4.5 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก	72
4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นด้ายไหมหลังการเคลือบด้วยที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโน ซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA.....	76
4.7 ผลการทดสอบความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียของเส้นด้ายไหม.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการวิจัย	79
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม.....	82
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของเส้นไหม	4
รูปที่ 2.2 วัฏจักรชีวิตของหนอนไหม.....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเส้นไหม	6
รูปที่ 2.4 การเกิดปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance	10
รูปที่ 2.5 กระบวนการยับยั้งแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์.....	11
รูปที่ 2.6 การทดสอบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยการยิงด้วยแสงเลเซอร์.....	14
รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงปริซึมที่มีขนาดและความหนาต่างกัน เนื่องจากใช้ตัวรีดิวซ์ที่ปริมาณแตกต่างกัน	15
รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยการเติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต (Na_3CA) ก่อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2).....	16
รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยการเติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต (Na_3CA) หลังไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2).....	16
รูปที่ 2.10 กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลม (silver nanospheres) ให้เป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์แบบแผ่น (silver nanoplates).....	17
รูปที่ 2.11 แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ระหว่างเส้นใยขนสัตว์ที่มีประจุที่ผิวเป็นบวกกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีประจุที่ผิวเป็นลบ	19
รูปที่ 2.12 แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ระหว่างเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการปรับผิวด้วย PDDA ให้มีประจุที่เป็นบวกกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีประจุที่ผิวเป็นลบ	19
รูปที่ 2.13 โครงสร้างผลึกของไททานี.....	21
รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททานี	24
รูปที่ 2.15 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	25
รูปที่ 2.16 การเคลือบไททานีและอนุภาคนาโนไททานีกับซิลเวอร์บนผ้าไหมที่ผ่านการปรับผิว. 25	
รูปที่ 4.1 ซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีที่เติม NaBH_4 ปริมาณ 0.1 – 1.0 มิลลิลิตร	39

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการดูดกลืนแสง ณ ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีสั่นที่เตรียมจาก NaBH_4 ปริมาณต่างๆ..... 40

รูปที่ 4.3 ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จากซิลเวอร์คอลลอยด์ (ก) สีน้ำเงิน (ข) สีม่วง (ค) สีม่วง-แดง (ง) สีน้ำตาล (จ) สีส้ม และ (ฉ) สีเหลือง..... 42

รูปที่ 4.4 การเกิดสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารละลายซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 มิลลิโมลาร์ 43

รูปที่ 4.5 จำนวนแบคทีเรีย *E. coli* (ก.) และ *S. aureus*. (ข) ในซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)..... 44

รูปที่ 4.6 จำนวนแบคทีเรีย *E. coli* (ก.) และ *S. aureus*. (ข) ในซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลืองที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)..... 44

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *E. coli*. และ *S. aureus*. ของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินและสีเหลือง 45

รูปที่ 4.8 (ก) ซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินที่ใช้วัด และ (ข) ค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างต่างๆ 46

รูปที่ 4.9 เส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านและผ่านการแช่ในซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินที่ pH ต่างๆ 46

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น (เส้นทึบ)และหลังผ่านไป 1 ชั่วโมง (เส้นประ) ของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ (ก) ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4, (ข) ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 5 และ (ค) ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 8 47

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเข้มสีของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างต่างๆ 48

รูปที่ 4.12 ค่าดัชนีเซต้าของเส้นด้ายไหมในสภาวะความเป็นกรด - ต่างที่แตกต่างกัน 49

รูปที่ 4.13 กราฟ FTIR แสดงหมู่ฟังก์ชันของเส้นด้ายไหม 49

รูปที่ 4.14 ค่าดัชนีเซต้าของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในคอลลอยด์ที่สภาวะความเป็นกรด - ต่างต่างกัน50

รูปที่ 4.15 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์..... 50

รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างแตกต่างกัน 51

รูปที่ 4.17 กราฟการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน (ก: 0.3 มิลลิลิตร) สีม่วง (ข: 0.5 มิลลิลิตร) และสีเหลือง (ค: 1.0 มิลลิลิตร).....	52
รูปที่ 4.18 ค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินหลังการย้อมเส้นด้ายไหมที่เวลาต่างๆ.	54
รูปที่ 4.19 ค่าความเข้มข้นของเส้นด้ายไหมที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร หลังผ่านการย้อมที่ระยะเวลาแตกต่างกัน.....	54
รูปที่ 4.20 เส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ใช้ปริมาณ NaBH_4 ในการสังเคราะห์ ตั้งแต่ (ก) 0.1 – 0.5 มิลลิลิตร และ (ข) 0.6 – 1.0 มิลลิลิตร.....	55
รูปที่ 4.21 กราฟค่าความเข้มข้นต่อความยาวคลื่นของเส้นด้ายไหมที่ย้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ สีต่างๆ ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ปริมาณ NaBH_4 0.1 – 1.0 มิลลิลิตร	56
รูปที่ 4.22 กราฟค่าความเข้มข้นของเส้นด้ายสีเหลืองเมื่อทำการวัดแบบสุ่มจำนวน 20 จุด	56
รูปที่ 4.23 (ก) ภาพซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวที่ได้จากการผสมระหว่างซิลเวอร์สีน้ำเงินและสีเหลือง 57 และ (ข) ค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน สีเหลือง และสีเขียว	57
รูปที่ 4.24 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) กราฟค่าความเข้มข้นต่อความยาวคลื่นของเส้นด้ายไหมสีเขียวที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวที่ได้จากการผสมสีเปรียบเทียบกับเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินและสีเหลืองที่ได้จากการสังเคราะห์	58
รูปที่ 4.25 ลักษณะผิวของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อมสี (ก) และ (ข) ผ่านการย้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า และลักษณะผิวของเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์สีน้ำเงิน (ค) และสีเหลือง (ง) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	59
รูปที่ 4.26 จำนวนแบคทีเรีย <i>E. coli</i> (ก) และ <i>S. aureus</i> . (ข) ในเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อมสีที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา).....	61
รูปที่ 4.27 จำนวนแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ในเส้นด้ายไหมสีน้ำเงิน (ก) และเส้นด้ายไหมสีเหลือง (ข) ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)	61
รูปที่ 4.28 จำนวนแบคทีเรีย <i>S. aureus</i> . ในเส้นด้ายไหมสีน้ำเงิน (ก) และเส้นด้ายไหมสีเหลือง (ข) ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา).....	61
รูปที่ 4.29 ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด <i>E. coli</i> . และ <i>S. aureus</i> . ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินและสีเหลือง	62

รูปที่ 4.30 จำนวนแบคทีเรีย *S. aureus*. ในซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียว (ก) และเส้นด้ายไหมสีเขียว (ข) ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)..... 63

รูปที่ 4.31 ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *S. aureus*. ของซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวและเส้นด้ายไหมสีเขียว 63

รูปที่ 4.32 องค์ประกอบเฟสและโครงสร้างจุลภาคของไททานี P25..... 64

รูปที่ 4.33 ภาพเส้นด้ายไหมสีเหลืองที่มีปริมาณไททานีแตกต่างกัน..... 65

รูปที่ 4.34 ภาพ FESEM ของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการซ้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีไททานีร้อยละ 1 (ก), 5 (ข) และ 10 (ค)..... 66

รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิค EDS ของเส้นเส้นด้ายไหมที่ผ่านการซ้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีการเติมไททานี 67

รูปที่ 4.36 กราฟแสดงร้อยละการส่องผ่านของแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 280 – 400 นาโนเมตรของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อม ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ (0% TiO_2) และซิลเวอร์คอลลอยด์ผสมไททานี (1%, 5%, และ 10% TiO_2)..... 68

รูปที่ 4.37 (ก) ภาพถ่ายเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบก่อนและหลังฉายแสงยูวี 24 ชั่วโมง (ข) ภาพถ่ายเส้นด้ายไหมที่มีปริมาณไททานีต่างๆ หลังฉายแสงยูวี 24 ชั่วโมง (ค) ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) หลังฉายแสงยูวี 24 ชั่วโมงของเส้นด้ายไหม 69

รูปที่ 4.38 ค่าแรงดึงที่จุดขาด (breaking force) ของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Silk), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีการเติมไททานีปริมาณต่างๆ (ร้อยละ 0 - 10)..... 71

รูปที่ 4.39 ภาพถ่าย FESEM ลักษณะพื้นผิวของเส้นไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ ไททานี (ก) ก่อนและ (ข) หลัง เคลือบด้วย PCA 73

รูปที่ 4.40 ค่าความแตกต่างของสีของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททานี หลังการซักล้างด้วยน้ำสะอาดอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสต่อจำนวนรอบการซักล้าง 74

รูปที่ 4.41 ค่าความแตกต่างของสีของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททานี หลังการซักล้างด้วยน้ำสบู่ตามมาตรฐาน ISO 105-C01: 1989 (E) ต่อจำนวนรอบการซักล้าง 75

รูปที่ 4.42 ภาพ FESEM แสดงผิวของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททานี/ PCA (ก) ก่อนและ (ข) หลังซักล้างด้วยน้ำสบู่ตามมาตรฐาน ISO 105-C01: 1989 (E)..... 76

รูปที่ 4.43 ค่าแรงดึงที่จุดขาด (breaking force) ของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Silk), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA (AgPCA) และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททานี/ PCA (AgTPCA) 77

รูปที่ 4.44 จำนวนแบคทีเรีย *S. aureus*. ในเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA (ก) และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททานี/ PCA (ข) ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)..... 78

รูปที่ 4.45 ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA (AgPCA) และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททานี/ PCA (AgTPCA) 78



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สมบัติของเงิน (Silver).....	9
ตารางที่ 2.2 ผลการได้ศึกษาชนิดของตัวรีดิวซ์ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และค่าความเป็นกรด - ด่างของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ได้หลังการสังเคราะห์	13
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเฉพาะของไททาเนีย	21
ตารางที่ 2.4 สมบัติต่าง ๆ ของไททาเนียที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน.....	22
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน	27
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการเคลือบเส้นไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียด้วยวิธีจุ่มแช่.....	27
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน และการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียด้วยวิธีจุ่มแช่	28
ตารางที่ 3.4 ระดับความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	33
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดผ้าหลายเส้นใย (Multifiber adjacent fabric) ชนิด DW.....	34
ตารางที่ 3.6 ส่วนประกอบของสบู่มাত্রฐาน.....	34
ตารางที่ 3.6 ระดับค่า UPF ในการป้องกันรังสียูวี.....	36
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดสภาวะที่ใช้ในการย้อมเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์	53
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดอัตราส่วนระหว่างปริมาตรคอลลอยด์ต่อน้ำหนักเส้นด้ายไหมต่อน้ำหนักไททาเนีย.....	64
ตารางที่ 4.3 ค่าสี L*a*b* ตามระบบ CIELAB ของเส้นด้ายไหมสีเหลืองที่มีปริมาณไททาเนียต่างกัน	65
ตารางที่ 4.4 ค่าสี L*a*b* ตามระบบ CIELAB ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินที่มีและไม่มีการเติมไททาเนียร้อยละ 5	71
ตารางที่ 4.5 ค่าสี L*a*b* ตามระบบ CIELAB ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินและสีเหลืองที่มีอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียก่อนและหลังเคลือบด้วย PCA	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เส้นไหมและผลิตภัณฑ์จากไหมไทยเป็นสิ่งทอที่มีความงดงาม ถือเป็นมรดกแห่งภูมิปัญญาไทยที่สะท้อนเอกลักษณ์ความเป็นไทยได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังเป็นหนึ่งในสินค้าส่งออกยอดนิยมที่สร้างรายได้ให้แก่ประเทศไทยมาช้านาน แต่ในปัจจุบันมีความนิยมเส้นใยสังเคราะห์โดยเฉพาะกลุ่มเส้นใยที่มีสมบัติพิเศษที่มากขึ้น ดังนั้นการพัฒนาเพื่อเพิ่มสมบัติพิเศษให้กับเส้นไหมจะช่วยเพิ่มความน่าสนใจให้กับเส้นไหมและผลิตภัณฑ์จากไหมไทยให้สามารถแข่งขันกับตลาดต่างประเทศได้

เส้นไหมเป็นเส้นใยโปรตีนธรรมชาติที่มีความเหนียว และเป็นมันวาว สามารถทนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส โดยไม่ติดไฟ และทนต่อความเป็นกรดต่างในช่วงค่าความเป็นกรด - ด่าง ระหว่าง 4 - 8 แต่ไม่ทนต่อแสงยูวี นอกจากนี้เส้นไหมยังมีผิวที่ขรุขระน้ำสูง จึงสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี สามารถย่อยสลายได้ดี¹¹ โดยในประเทศไทยนิยมนำเส้นไหมมาทอเป็นผืนผ้าสำหรับตัดเย็บเป็นเครื่องนุ่งห่ม แต่เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อนชื้น ส่งผลให้ร่างกายมีอัตราการขับเหงื่อที่สูง บวกกับสมบัติการดูดซับน้ำและความชื้นได้ดีของเส้นไหม จึงทำให้เครื่องนุ่งห่มจากไหมเกิดการดูดซับเหงื่อโคลและเกิดการสะสมของเชื้อแบคทีเรียบนเนื้อผ้าได้ง่าย ซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์และเกิดเชื้อโรคที่อาจเป็นสาเหตุของโรคภัยต่าง ๆ อีกทั้งยังทำให้ผ้าไหมเสื่อมสภาพ นอกจากนี้การทำความสะอาดผลิตภัณฑ์จากไหมต้องเป็นไปอย่างระมัดระวังและมีข้อจำกัด เช่น การงดใช้ผงซักฟอกและการซักอย่างเบามือ เป็นต้น ซึ่งจากข้อจำกัดดังกล่าวอาจทำให้การทำความสะอาดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ดังนั้นการกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่สะสมในผ้าเหล่านั้นจะสามารถลดปัญหาดังที่กล่าวมาได้

ซึ่งการเพิ่มสมบัติพิเศษในการต้านแบคทีเรียแก่เส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นสิ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเส้นด้ายไหมสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย เช่น การทอเป็นผืนผ้า หรือการปักเย็บ อีกทั้งอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถสังเคราะห์ได้ง่ายด้วยปฏิกิริยารีดักชันและไม่เป็นพิษต่อร่างกาย จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายทางการแพทย์ในการต้านแบคทีเรีย นอกจากนี้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ยังมีสมบัติพิเศษ คือ สมบัติ Localized surface plasmon resonance (LSPR) ส่งผลให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีสีที่แตกต่างกันขึ้นกับรูปร่างหรือขนาด ซึ่งสามารถใช้เป็นสีย้อมแก่สิ่งทอได้

นอกจากนี้ยังพบว่าไททาเนียที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติพิเศษทางแสง เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงจะมีความสามารถในการต้านแบคทีเรียได้เช่นกัน โดยไททาเนียสามารถทำลายแบคทีเรียได้โดยไม่เหลือซาก จึงช่วยลดการเกิดเชื้อโรคตามมาหลังการทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งนอกจากสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียแล้ว ด้วยสมบัติการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง ทำให้ไททาเนียเมื่อนำมาเคลือบลงบนสิ่งทอเพื่อเพิ่มสมบัติการป้องกันรังสียูวีได้อีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการย้อมสีและการเพิ่มสมบัติต้านแบคทีเรียแก่เส้นด้ายไหมโดยการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียโดยยังคงรักษาสมบัติอันดีของเส้นไหมไว้ โดยจะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดสีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เช่น ปริมาณตัวรีดิวซ์และค่าความเป็นกรด – ด่าง และหาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย จากนั้นจึงศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ร่วมกับไททาเนียต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการป้องกันรังสียูวีและสมบัติต้านแบคทีเรียของเส้นด้ายไหมที่เตรียมได้ตามมาตรฐานการทดสอบสิ่งทอ นอกจากนี้ยังศึกษาการเพิ่มความคงทนของสีต่อการซักด้วยการเคลือบสารยึดติดพอลิอะคริลิกบนผิวของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์หลากหลายสี
- 1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติต้านแบคทีเรียของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์หลากหลายสีโดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน และปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของซิลเวอร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด – ด่างและความเข้มข้นของสารตั้งต้น
- 1.2.2 ศึกษากระบวนการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย และปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลือบเส้นด้ายไหม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด – ด่างของซิลเวอร์คอลลอยด์และระยะเวลาที่ใช้
- 1.2.3 ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของไททาเนียต่อการเคลือบลงบนเส้นไหมร่วมกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์และการเพิ่มสมบัติการป้องกันรังสียูวี

1.2.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติต้านแรงคืบของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการเคลือบด้วย
ด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททานี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เส้นด้ายไหมย้อมสีโดยการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททานีที่มีสมบัติต้าน
แบคทีเรีย

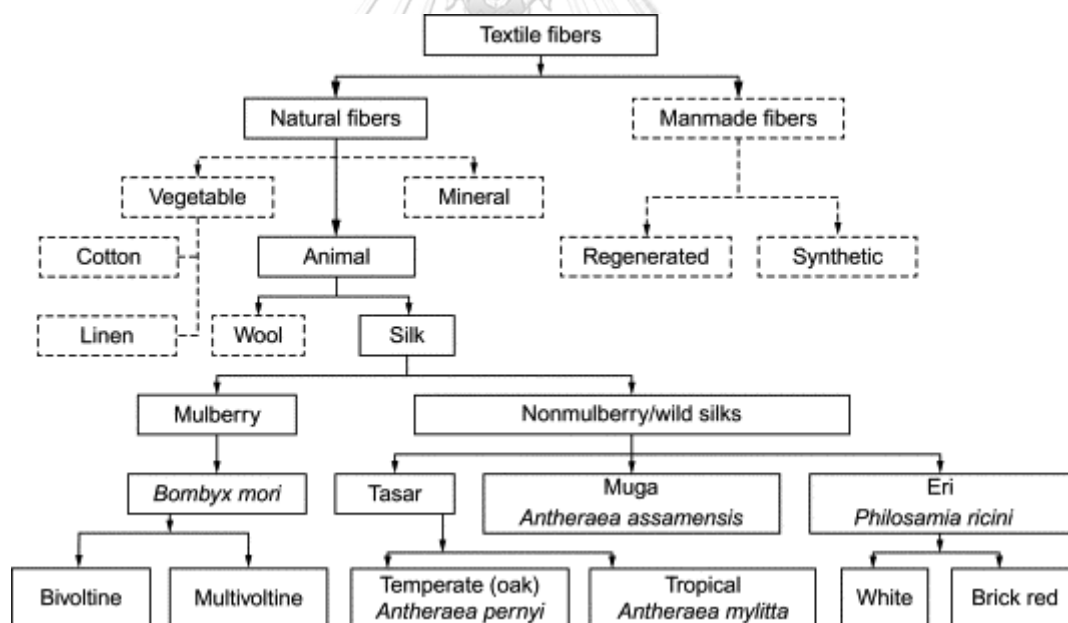


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไหม (Silk)

ไหม (Silk) เป็นเส้นใยโปรตีนธรรมชาติที่ผลิตจากหนอนไหมหรือแมลงในอันดับ (Order) Lepidopteran โดยหนอนไหมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ไหมบ้าน (Domestic silkworm) และ ไหมป่า (Wild silkworm) ซึ่งไหมบ้านจะกินใบหม่อนเป็นอาหาร (Mulberry silkworm) สายพันธุ์ที่นิยมคือ *Bombyx mori*. เรียกว่าไหมหม่อน ส่วนไหมป่าเป็นไหมที่ไม่ได้กินใบหม่อนเป็นอาหาร (Non-mulberry silkworm) สายพันธุ์ที่นิยมคือ *Samia ricini*. เรียกว่าไหมอีรี่ (Eri silkworm) ที่กินใบละหุ่งและใบมันสำปะหลังเป็นอาหาร ซึ่งการแบ่งประเภทของเส้นไหมแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยเส้นไหมหม่อนจะมีลักษณะผิวเรียบ เป็นมันวาว และมีสีขาวนวล ส่วนเส้นไหมอีรี่จะมีลักษณะหยิกงอไม่เรียบ เมื่อสัมผัสจะมีลักษณะเป็นปุ่มปม สีขาวนวลและความเงापานกลาง^[1-3]

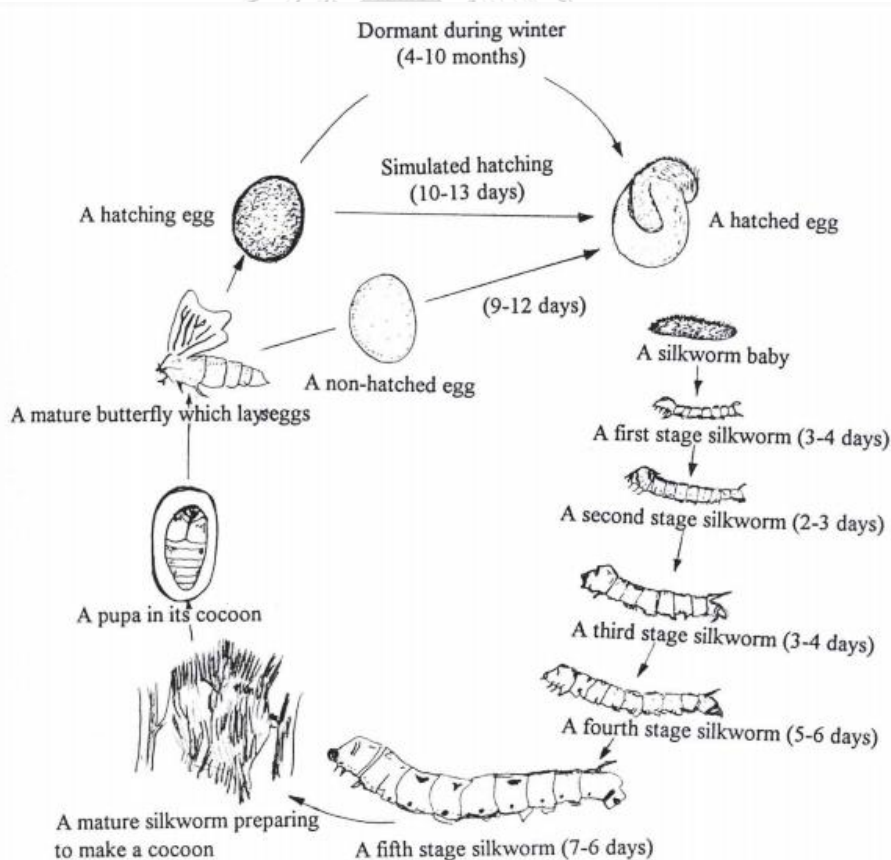


รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของเส้นไหม^[2]

2.1.1 วัฏจักรชีวิตของหนอนไหม^[1]

ผีเสื้อไหมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (Completely metamorphosis insect) แบ่งออกเป็น 4 ระยะ ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2.2)

- 1) ระยะไข่ไหม (eggs) มี 2 ชนิด คือไข่ไหมที่ฟักตัวหรือไข่จำศีล (hibernating eggs) จำเป็นต้องได้รับการกระตุ้นให้เกิดการฟักโดยการใส่สารละลายกรดเกลือ ซึ่งหลังจากไข่ไหมได้รับการกระตุ้นจะสามารถฟักออกเป็นตัวภายใน 10 -13 วัน ส่วนไข่ไหมที่ไม่ฟักตัวหรือไข่ไม่จำศีล (non - hibernating eggs) จะฟักภายใน 9 - 12 วัน
- 2) หนอนไหม (larvae) ระยะนี้จะมีอายุประมาณ 19 - 25 วัน โดยหนอนไหมแรกเกิดจะมีลำตัวสีดำ ในระหว่างการเจริญเติบโตตัวหนอนไหมจะมีการลอกคราบทั้งหมด 4 ครั้ง เมื่อโตเต็มที่พร้อมจะทำรังจะเรียกว่า ไหมสุก โดยจะมีลำตัวใส สายหัวไปมาเพื่อพันเส้นใยสำหรับทำรัง ซึ่งจะใช้เวลา 2 - 3 วันในการพันเส้นใยและลอกคราบเป็นดักแด้
- 3) ระยะดักแด้ (pupae) ใช้เวลาประมาณ 10 -13 วัน ก่อนจะลอกคราบเป็นตัวเต็มวัย
- 4) ผีเสื้อ (moth) เป็นระยะตัวโตเต็มวัยของหนอนไหมทำหน้าที่ผสมพันธุ์และวางไข่ โดยจะมีอายุประมาณ 7 -10 วัน

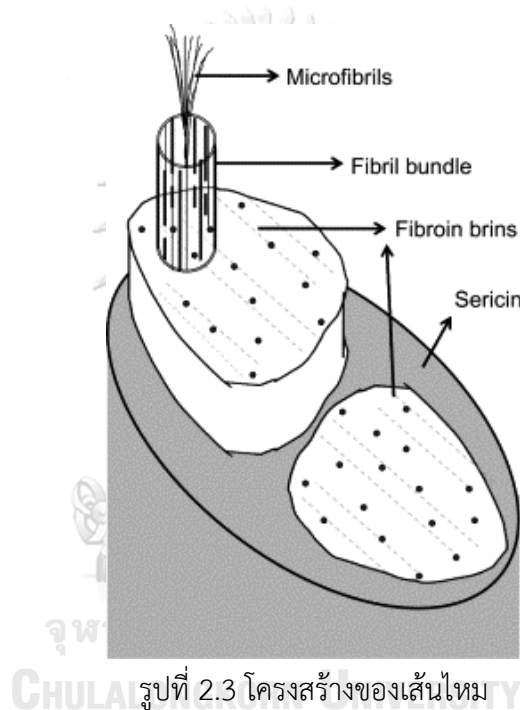


รูปที่ 2.2 วัฏจักรชีวิตของหนอนไหม^[1]

2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของเส้นไหม^[2-4]

ไหมเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องตลอดเส้น มีผิวเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอตามความยาวของเส้นใย พื้นที่หน้าตัดเป็นสามเหลี่ยมมุมมน

เส้นไหมประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด คือ ไฟโบรอิน (Fibroin) หรือส่วนเส้นใยไหม (silk filament) เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ คิดเป็นร้อยละ 70 – 75 ของน้ำหนักเส้นไหม โดยใน 1 เส้นไหมจะประกอบด้วยเส้นใยไหม 2 เส้น ซึ่งเชื่อมกันอยู่ด้วยเซริซิน (Sericin) หรือกาวไหม (Silk gum) ที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 25-30 โดยน้ำหนัก โดยเซริซินเป็นโปรตีนที่สามารถละลายได้ในน้ำร้อน แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเส้นไหม

ไฟโบรอินประกอบด้วยธาตุที่สำคัญคือ คาร์บอน (ร้อยละ 48 – 49) ไฮโดรเจน (ร้อยละ 6.40 – 6.51) ไนโตรเจน (ร้อยละ 17.35 – 18.89) และออกซิเจน (ร้อยละ 26.00 – 27.90) โดยมีองค์ประกอบดังนี้

- 1) สายโซ่โปรตีนหลักหรือสายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (heavy chain) ที่มีจัดเรียงตัวเป็นผลึก (Crystalline) ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ 2 ชนิด คือ ไกลซีน (Glycine) และอะลานีน (Alanine)
- 2) สายโซ่โปรตีนรองหรือสายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (light chain) ที่มีโครงสร้างของสายโซ่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่แสดงประจุหลายชนิด เช่น ซีรีน (Serine) ลิวซีน (Leucine) และวาเลีน (Valine) เป็นต้น

ซึ่งสายโซ่ทั้ง 2 สายจะเชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bond) โดยมีไกลโคโปรตีน P25 (Glycoprotein P25) ที่ประกอบด้วยพอลิเปปไทด์ (Polypeptide) และโอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) ทำหน้าที่เชื่อมสายโซ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและโมเลกุลต่ำเข้าด้วยกัน

ส่วนเซรีซินจะประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ กรดกลูตามิก (Glutamic acid) ทรีโอนีน (Threonine, Thr) และไทโรซีน (Tyrosine, Tyr) กรดอะมิโนเหล่านี้จะเรียงตัวกันแบบสุ่มเกิดเป็นบริเวณอสัณฐาน (amorphous)

โครงสร้างเส้นไหมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) ประกอบด้วยแผ่นบีต้า (β -sheet) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เส้นไหมมีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากแผ่นเบต้าแต่ละแผ่นซ้อนทับกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ และส่วนที่เป็นอสัณฐาน คือ โครงสร้างเกลียวสุ่ม (random coil) เป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรและสามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้ เมื่อได้รับความร้อน การให้แรงทางไฟฟ้า และการเติมด้วยสารละลายที่มีซัลเฟอร์ เช่น เมทานอล หรือ อะซิโตน

2.1.3 สมบัติทางกายภาพของเส้นไหม^[1-6]

- 1) ลักษณะภายนอก เส้นไหมที่ผ่านการลอกแล้วจะมีสีตั้งแต่สีเหลืองไปจนถึงสีเทา มีความมันวาวดีมาก และมีผิวเรียบ แต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวเส้นใย
- 2) ความแข็งแรง (tensile strength) ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงสูง สามารถทนต่อแรงดึงได้ดี โดยเส้นไหมแห้งจะมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นไหมเปียก
- 3) ความยืดหยุ่น ไหมเป็นเส้นใยที่ยืดหยุ่นตัวได้ดี โดยมีร้อยละการยืดตัว (%Elongation) ประมาณร้อยละ 20 – 35 ของความยาวเดิม และสามารถหดกลับคืนได้ถึงร้อยละ 92
- 4) ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เส้นไหมที่ไม่ผ่านการลอกมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.3 – 1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- 5) การดูดซึมน้ำ เส้นไหมสามารถดูดซึมน้ำได้ดี โดยมีค่าการดูดซึมน้ำขึ้นกับร้อยละ 11 ทำให้สามารถย้อมติดสีได้ดี
- 6) ความร้อน สามารถทนความร้อนได้ถึง 140 องศาเซลเซียสเมื่อได้รับความร้อนติดต่อกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง และจะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิถึง 171 องศาเซลเซียส

2.1.4 สมบัติทางเคมีของเส้นไหม^[1-6]

- 1) ความเป็นกรด – ด่าง เส้นไหมสามารถทนความเป็นกรด – ด่างได้ในช่วงค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4 – 8 ได้ โดยเส้นไหมสามารถทนต่อความเป็นกรดได้ดีกว่าความเป็นด่าง เนื่องจากในสภาวะต่างเส้นไหมจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ที่พันธะพอลิเปปไทด์จากบริเวณปลายสายโซ่โมเลกุลของไฟโบรอิน ส่งผลให้ไฟโบรอินถูกทำลาย ทำให้ความแข็งแรงของเส้นไหมลดลง
- 2) แสง เส้นไหมไม่ทนต่อแสงยูวี โดยเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นระยะเวลาานานจะทำให้เกิดการสลายตัวของโปรตีน ส่งผลให้ความแข็งแรงและค่าการหดตัวลดลง อีกทั้งยังทำให้เส้นไหมเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอีกด้วย
- 3) การละลายน้ำ เส้นไหมไม่สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะสูญเสียความแข็งแรงเมื่อแช่ในน้ำหรือได้รับไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
- 4) เกลือคลอไรด์ เส้นไหมสามารถถูกทำลายด้วยสารที่มีส่วนผสมของเกลือคลอไรด์ ได้แก่ เหนือ น้ำยาดับกลิ่น และน้ำเกลือ
- 5) สารซักฟอก เส้นไหมสามารถถูกทำลายด้วยสารซักฟอกประเภทออกซิไดส์ เช่น สารซักฟอกกลุ่มโซเดียมไฮโปคลอไรด์ แต่สามารถทนต่อสารซักฟอกประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือโซเดียมเปอร์บอเรต
- 6) การย้อมสี เส้นไหมมีความสามารถในการรับสีย้อมได้ดีมาก โดยสามารถย้อมได้ทั้งสีที่เป็นกรดหรือด่างหรือสีใดแรก และสามารถย้อมสีได้ในอุณหภูมิต่ำ

เส้นไหมสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งนอกจากการนำมาถักทอเป็นผืนผ้าไหมแล้ว ยังสามารถนำเส้นไหมไปผสมกับเส้นใยชนิดอื่นๆได้อีกด้วย เช่น เส้นใยฝ้าย ลินิน และขนสัตว์ เป็นต้น

2.2 อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Silver nanoparticle)

เงิน (Silver) มีสัญลักษณ์คือ Ag เป็นธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 47 อยู่ในหมู่ IB ในตารางธาตุ เป็นโลหะและโลหะทรานซิชันที่มีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก มีสีขาว เนื้อค่อนข้างอ่อนสามารถนำมาขึ้นรูปได้หลากหลาย โดยมีสมบัติแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของเงิน (Silver)^[7]

คุณสมบัติ	
ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	เงิน, Ag, 47
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	11, 5, d
เลขอะตอม	47
น้ำหนักอะตอม	107.870 amu
จุดหลอมเหลว	960.8 °C
จุดเดือด	2210 °C
ความหนาแน่น	10.5 g/cc ที่ 20 °C

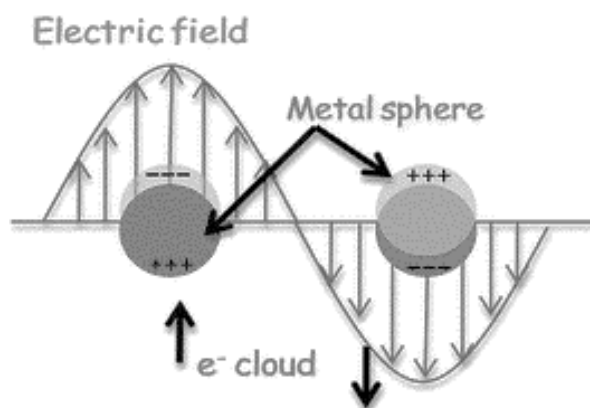
อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Silver nanoparticle) คืออนุภาคเงินที่ถูกสังเคราะห์ให้มีขนาดระดับนาโน โดยทั่วไปจะมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ทำให้มีปริมาณพื้นที่ผิวสูงมาก และสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ทางการแพทย์ เทคโนโลยีทางอาหาร และทางอุตสาหกรรมและวิศวกรรม เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีสมบัติที่โดดเด่น โดยเฉพาะสมบัติทางแสง (optical property) และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย (antibacterial property)^[8]

2.2.1 สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนซิลเวอร์^[9-11]

สมบัติทางแสงที่โดดเด่นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์คือสมบัติ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของอนุภาคนาโนโลหะ เช่น อนุภาคนาโนทอง (Gold nanoparticles) หรืออนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Silver nanoparticles)

สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะเกิดจากการสั่น (oscillation) ของอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคนาโน (localized surface plasmons) ที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างอนุภาคนาโนโลหะกับสารไดอิเล็กตริก โดยจะเกิดขึ้นเมื่อแสงที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบลงบนอนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงที่มากกระตุ้น ซึ่งอิเล็กตรอนที่ผิวของอนุภาคเมื่อเกิดการสั่นรวม (collective oscillation) จะส่งผลให้เกิดการแยกกันของประจุ โดยประจุลบจะรวมตัวอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคและประจุบวกจะรวมตัวอยู่ด้านหลังตรงข้าม และทำให้เกิดไดโพลขึ้น (electric dipole) โดยไดโพลที่เกิดขึ้นจะสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างอนุภาคนาโนโลหะกับสารไดอิเล็กตริกที่ทำหน้าที่เป็นแรงดึงกลับมาที่ตำแหน่งสมดุล (restoring force) และเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายออกจากตำแหน่งสมดุลจะทำให้เกิดการสั่นที่มีความถี่เรโซแนนซ์ (plasmon frequency) โดยทั่วไปจะ

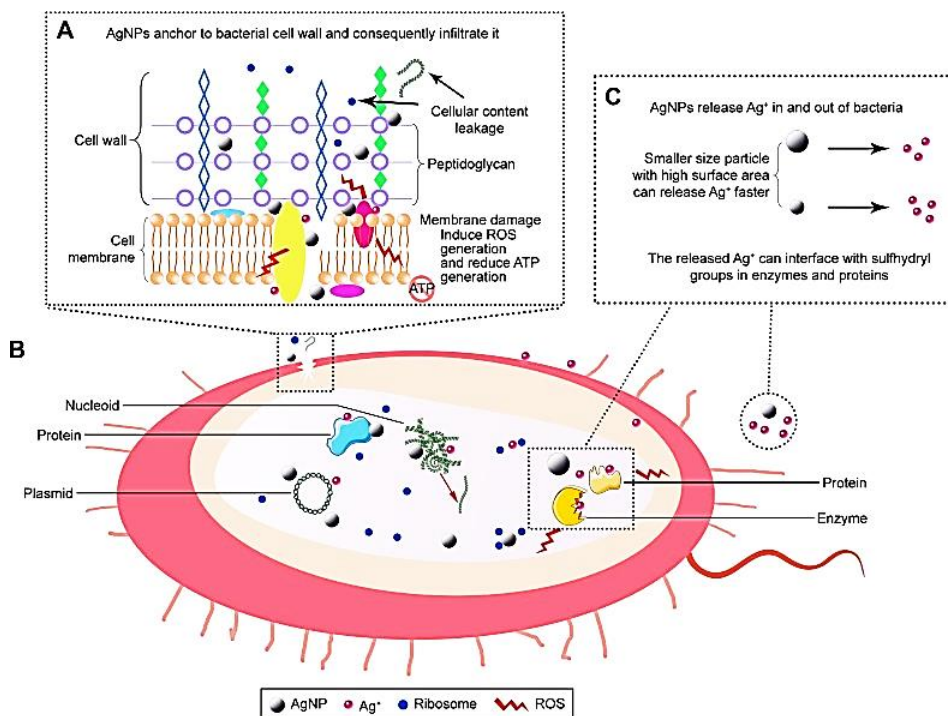
อยู่ในช่วงยูวี ถึงแสงที่มองเห็นได้ ซึ่งเมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอน (plasmon frequency) จะเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance ที่ทำให้อนุภาคนาโนเกิดการดูดกลืนแสงที่ความถี่เฉพาะเจาะจงค่าหนึ่งๆ ขึ้นกับขนาดหรือรูปร่างของอนุภาคนาโน ซึ่งการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันส่งผลให้อนุภาคนาโนโลหะมีสีที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance^[9]

2.2.2 สมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์^[12]

กลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคนาโนซิลเวอร์เกิดการเกาะที่ผนังเซลล์และแทรกเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรีย โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน (O_2) ที่ผิวสัมผัสของเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย แล้วเกิดการแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ซึ่งจะสามารถเกิดการรวมตัวกับดีเอ็นเอภายในเซลล์แบคทีเรีย โดยประจุบวกของซิลเวอร์ไอออนจะเข้าไปจับกับเอนไซม์โปรตีนเอส (proteinase) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบเมตาบอลิซึม (metabolism) ของเซลล์และหมู่ซัลไฟด์ไรล (Sulphydryl: $-SH$) ของเอนไซม์ ที่มีอะตอมของซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบและมีประจุเป็นลบ ส่งผลให้โปรตีนเกิดการแปลงสภาพ (denature) การควบคุมระบบลำเลียงสารเข้าและออกจากเซลล์ผิดปกติ นอกจากนี้ซิลเวอร์ไอออนยังจับกับโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสืบพันธุ์ (reproduction) และการหายใจระดับเซลล์ (respiration) ของเซลล์แบคทีเรีย ส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียหยุดการเจริญเติบโต เสื่อมสภาพและตายในที่สุด ซึ่งความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ขึ้นกับความเร็วในการแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออน โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะสามารถแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออนได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่า จึงมีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียได้ดีกว่า



รูปที่ 2.5 กระบวนการยับยั้งแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิลเวอร์^[12]

2.2.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์

วิธีสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี^[13] คือ วิธีการทางเคมี (Chemical approach) วิธีการทางกายภาพ (Physical approach) และวิธีการทางชีวภาพ (Biological approach) ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังต่อไปนี้

2.2.3.1 วิธีการทางเคมี

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีการทางเคมีหรือวิธีการเกิดปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน (chemical reduction) เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้กันมากที่สุด โดยวิธีการนี้จะอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันระหว่างซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) กับตัวรีดิวซ์ได้เป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag^0) มีข้อดีคือสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมากและควบคุมขนาดและรูปร่างได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือใช้สารเคมีค่อนข้างมาก โดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังนี้

- 1) เกลือของซิลเวอร์ (silver salt) ที่นิยมใช้คือ ซิลเวอร์ไนเตรต ทำหน้าที่เป็นตัวให้ซิลเวอร์ไอออน
- 2) ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride: NaBH_4), โซเดียมซิเตรต (sodium citrate) และกรด

วิตามินซี (ascorbic Acid) เป็นต้น มีหน้าที่รีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออน ให้เป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์

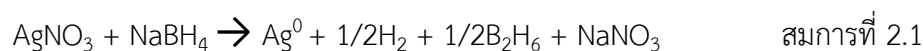
- 3) สารให้ความคงตัว (stabilizer) โดยส่วนมากจะเป็นสารพอลิเมอร์ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol): PVA) และพอลิไวนิลไพโร-รีโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) เป็นต้น ซึ่งสารให้ความคงตัวมีหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาค

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ ชนิดของตัวรีดิวซ์, อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์, ความเร็วในการปั่น (stirring speed) และค่าความเป็นกรด - ด่าง เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2008 Gulrajani และคณะ^[14] ได้ศึกษาอุณหภูมิและความเร็วในการปั่นที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ใช้กลูโคสและไฮดราซีนเป็นตัวรีดิวซ์ พบว่าขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ลดลง เมื่ออุณหภูมิและความเร็วในการปั่นเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2014 Pris^[15] ได้ศึกษาชนิดของตัวรีดิวซ์ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และค่าความเป็นกรด - ด่าง (ค่า pH) ของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ได้หลังการสังเคราะห์โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเป็นตัวให้ซิลเวอร์ไอออน ซึ่งตัวรีดิวซ์ที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมโบโรไฮไดรด์, ไตรโซเดียมซิเตรต, และกรดวิตามินซี ซึ่งสมการเคมีของการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นไปตามสมการที่ 2.1 - 2.3 โดยผลการศึกษสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.2

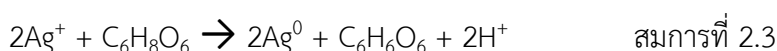
สังเคราะห์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์:



สังเคราะห์ด้วยไตรโซเดียมซิเตรต:



สังเคราะห์ด้วยกรดวิตามินซี:



ตารางที่ 2.2 ผลการได้ศึกษาชนิดของตัวรีดิวซ์ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และค่าความเป็นกรด – ด่างของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ได้หลังการสังเคราะห์

ตัวรีดิวซ์	ผลการศึกษา		
	อุณหภูมิที่ใช้ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาที่ใช้ (นาที)	ค่า pH ของซิลเวอร์ คอลลอยด์
โซเดียมโบโรไฮไดรด์	0	15	8
ไตรโซเดียมซิเตรต	70	30	9
กรดวิตามินซี	20	30	3.5

ในปี ค.ศ. 2019 Fernando และ Zhou^[16] ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด – ด่างที่ส่งผลต่ออนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยอาศัยกรดแอสติกในการปรับค่าความเป็นกรด – ด่าง พบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดมากขึ้น โดยมีค่าความเป็นกรด – ด่างตั้งแต่ 5 ลงไป อนุภาคนาโนซิลเวอร์จะถูกละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจากโปรตอน ส่งผลให้อนุภาคสูญเสียความเสถียรและเกิดการรวมตัวกัน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.4 – 2.6

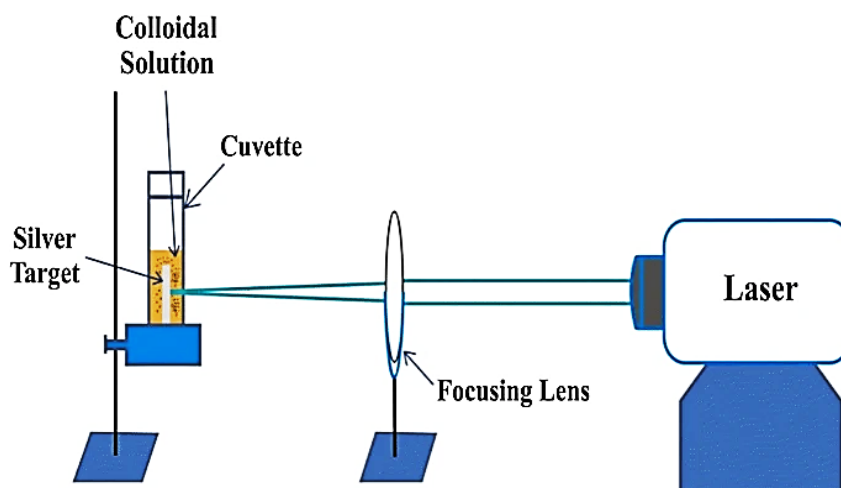


2.2.3.2 วิธีการทางกายภาพ

ข้อดีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีการทางกายภาพคือ อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง สามารถควบคุมขนาด รูปร่าง และปริมาณของอนุภาคได้ง่าย แต่ข้อเสียคือเครื่องมือที่ใช้มีราคาแพงทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง เช่น การสังเคราะห์ด้วยวิธีการระเหยและควบแน่น (evaporation–condensation) โดยใช้เตาเผาแบบหลอดแก้ว (tube furnace) และการสังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ (laser ablation)

ในปี ค.ศ. 2019 Rafique และคณะ^[17] ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยการยิงเลเซอร์ โดยใช้เลเซอร์มี 2 ชนิดคือ เลเซอร์สารกึ่งตัวนำและเลเซอร์ของแข็งชนิด Nd:YAG เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์เมื่อยิงผ่านแผ่นเงินที่อยู่ในน้ำปราศไอออน ดังแสดงรูปที่ 2.6 พบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยการยิงด้วยแสงเลเซอร์ โดยอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีการกระจาย

สม่ำเสมอ ซึ่งอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ได้จากการยิงด้วยเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าเมื่อเทียบการยิงด้วยเลเซอร์ของแข็ง



รูปที่ 2.6 การทดสอบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยการยิงด้วยแสงเลเซอร์^[17]

2.3.3 วิธีการทางชีวภาพ

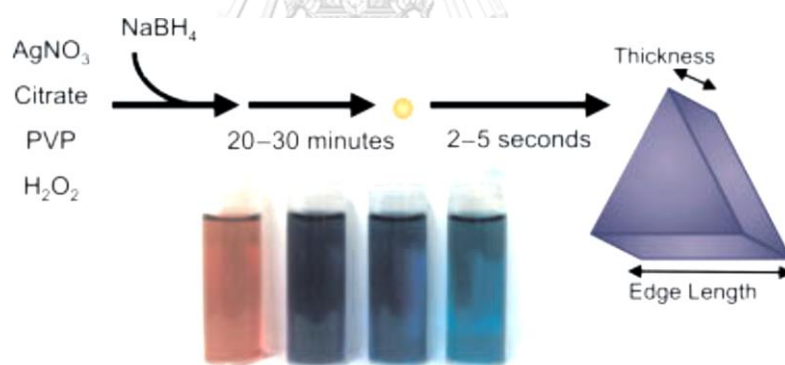
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยวิธีการทางชีวภาพสามารถลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์คือการเกิดปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน โดยแตกต่างจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี คือ วิธีการทางชีวภาพจะใช้ตัวรีดิวซ์และสารให้ความคงตัวจากธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา ยีสต์และสารสกัดจากพืช ดังนั้นข้อดีของการสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางชีวภาพคือใช้สารเคมีในปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีและทางกายภาพ และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ เนื่องจากตัวรีดิวซ์และสารให้ความคงตัวเป็นสิ่งที่สกัดได้จากธรรมชาติ ส่วนข้อเสียคือควบคุมขนาด รูปร่างและความเป็นผลึกของอนุภาคได้ยาก

ในปี ค.ศ 2017 He และคณะ^[18] ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยการใช้เซริซินเป็นตัวรีดิวซ์และให้แสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า สามารถใช้เซริซินเป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ โดยอนุภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลม และมีสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ได้ดีและอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ร่างกายมนุษย์ จึงสามารถนำมาใช้ในทางการแพทย์ได้

2.2.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีสัณฐานต่างกัน

เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีสมบัติการเกิด Localized Surface Plasmon Resonance ส่งผลให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีสัณฐานต่างกัน จะแสดงสีของอนุภาคแตกต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2005 Metraux และคณะ^[19] ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์รูปทรงปริซึมขึ้น โดยอาศัยสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต (citrate) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นตัวควบคุมรูปร่างอนุภาคให้เป็นทรงปริซึม เนื่องจากซิเตรตไอออนจากสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตจะทำหน้าที่ป้องกันหน้า {111} ของอนุภาคไว้ ในขณะที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำหน้าที่ออกซิไดซ์อนุภาคส่วนอื่นๆ จนได้เป็นอนุภาครูปทรงปริซึม โดยมีสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) เป็นตัวรีดิวซ์ และโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาค ซึ่งพบว่าเมื่อเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณที่แตกต่างกันส่งผลให้ได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์รูปทรงปริซึมที่มีขนาดและความหนาของอนุภาคต่างกัน ซึ่งทำให้อนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีสีแตกต่างกัน โดยสามารถสังเกตได้จากซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีสีแตกต่างกันคือซิลเวอร์คอลลอยด์สีแดง สีม่วง และน้ำเงิน ดังแสดงในรูปที่ 2.7

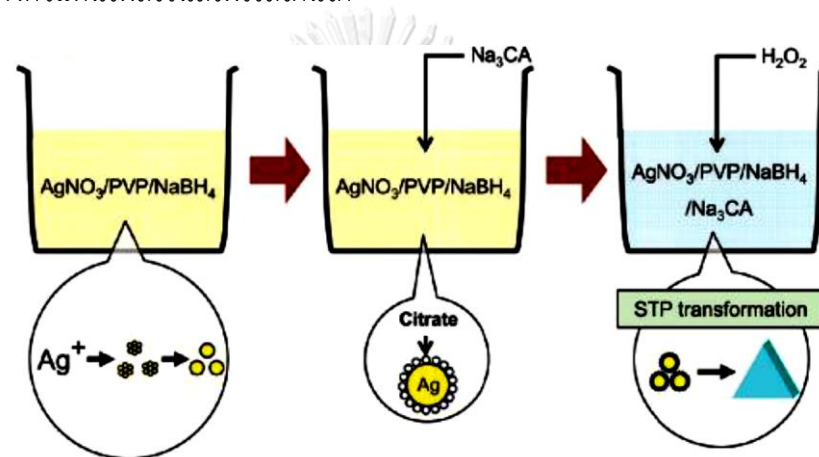


รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงปริซึมที่มีขนาดและความหนาต่างกัน เนื่องจากใช้ตัวรีดิวซ์ที่ปริมาณแตกต่างกัน^[19]

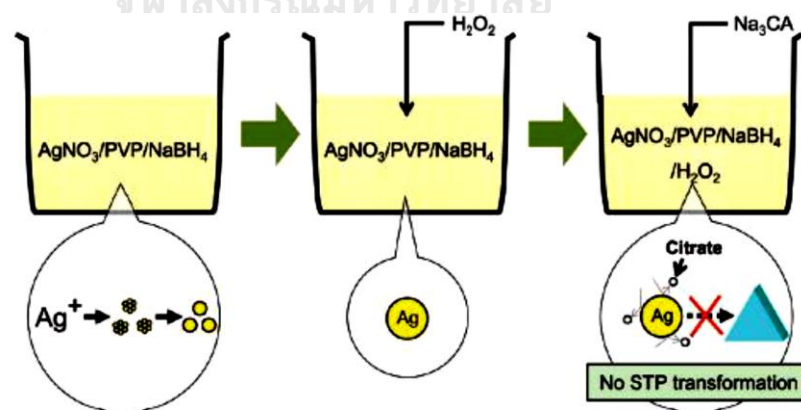
ในปี ค.ศ. 2012 Tsuji และคณะ^[20] ศึกษากระบวนการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์รูปทรงปริซึมที่สัมพันธ์กับลำดับขั้นในการเติมสารตั้งต้น ได้แก่ สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) สารละลายไตรโซเดียมซิเตรต (Na_3CA) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) พบว่าโพลีไวนิลไพโรลิโดนมีความสำคัญน้อยมากในการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์รูปทรงปริซึม ซึ่งลำดับในการเติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีความสำคัญอย่างมากในการเกิดอนุภาคนาโนปริซึม โดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์ก่อนสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต จะทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงนาโนปริซึมได้ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปขัดขวางการจับกันระหว่างซิลเวอร์ไอออนกับซิเตรตไอออน ทำให้ได้เป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลมที่มีซิลเวอร์คอลลอยด์เป็นสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.8 – 2.9

นอกจากนี้ยังพบว่าหลังการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ซิเตรตไอออนจะทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัวแก่อนุภาคนาโนซิลเวอร์ เนื่องจากการมีซิเตรตไอออนที่เป็นประจุลบล้อมรอบอนุภาค จะช่วยลดการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตเป็นสารให้ความคงตัวแทนโพลีไวนิลไพโรลิโดนได้



รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยการเติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต (Na_3CA) ก่อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)^[20]



รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยการเติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต (Na_3CA) หลังไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)^[20]

ในปี ค.ศ. 2015 Parnklang และคณะ^[21] ศึกษาความสำคัญของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ต่อการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลม (nanospheres) เป็นแบบแผ่น (nanoplates) โดยมีซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) เป็นสารตั้งต้น สารละลายโซเดียมโบโร - ไฮไดรด์ ($NaBH_4$) เป็นตัวรีดิวซ์ โดยมีสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต (Na_3CA) และพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เป็นสารให้ความคงตัว โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้น โอกาสในการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์แบบแผ่นยิ่งมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สามารถละลายอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลมที่ไม่เสถียรให้กลายเป็นซิลเวอร์ไอออน และซิลเวอร์ไอออนที่เกิดขึ้นนี้สามารถถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หลงเหลือในระบบ ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการโตของอนุภาคนาโนซิลเวอร์แบบแผ่นให้มากขึ้น ดังรูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลมให้เป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์แบบแผ่น



รูปที่ 2.10 กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลม (silver nanospheres) ให้เป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์แบบแผ่น (silver nanoplates)

2.2.5 การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์กับสิ่งทอ

ในปัจจุบันอนุภาคนาโนซิลเวอร์นิยมนำมาเคลือบผิวของสิ่งทอเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษ โดยเฉพาะสมบัติการต้านแบคทีเรียและการนำอนุภาคนาโนซิลเวอร์มาเป็นสารให้สีแก่สิ่งทอ

ในปี ค.ศ. 2008 Gulrajani และคณะ^[14] ศึกษาการเคลือบผ้าไหมด้วยนาโนอนุภาคซิลเวอร์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน โดยใช้ไฮดราซีนและกลูโคสเป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนจากสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต พบว่าสามารถเคลือบผ้าไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ โดยการจุ่มแช่ โดยค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 4 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเคลือบ เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรด ไหมจะแสดงประจุที่ผิวเป็นบวก ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีประจุที่ผิวเป็นลบ

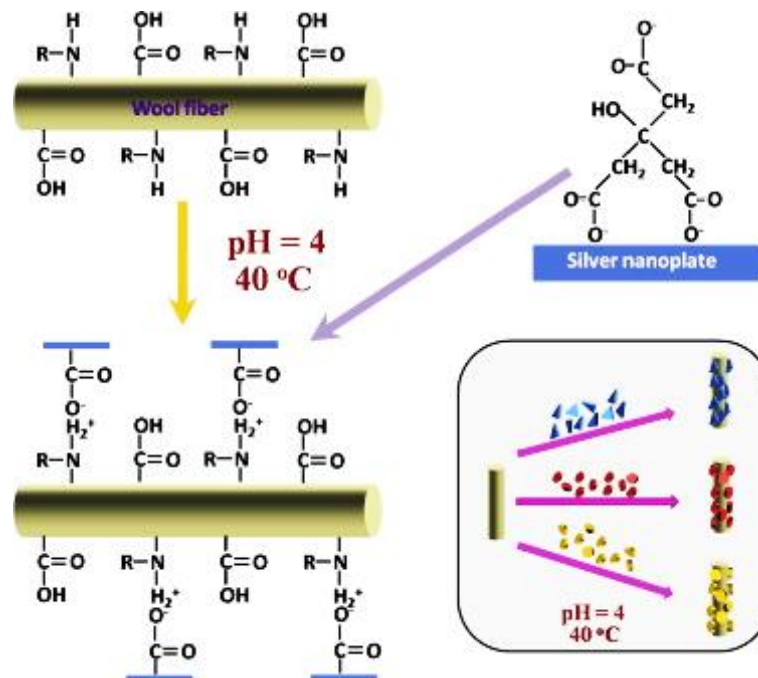
สามารถเคลือบลงบนผิวของไหมได้ด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ซึ่งการเคลือบติดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์บนผิวของผ้าไหมสามารถตรวจสอบได้จากค่าความเข้มข้น (K/S) ของผ้าไหมหลังการเคลือบ เนื่องจากหลังการเคลือบพบว่าสีของผ้าไหมเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เป็นผลมาจากสีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นสีเหลือง โดยผ้าไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก *S. aureus*. ได้ 100%

ในปี ค.ศ. 2010 Moazami และคณะ^[22] ได้ทำการศึกษาสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของเส้นไหมดิบและเส้นไหมที่ผ่านการลอกกาวที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ตั้งแต่ 10 ถึง 100 ppm พบว่า ความสามารถในการต้านแบคทีเรียของเส้นไหมเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์เพิ่มขึ้น และอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะสามารถแสดงสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด โดยเส้นไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถต้านแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวก (*S. aureus*.) และแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*.)

ในปี ค.ศ. 2011 Tang และคณะ^[23] ได้ศึกษาการย้อมสีผ้าขนสัตว์ด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์คือ สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ พอลิไวนิลไพโรลิโดน สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการศึกษาครั้งนี้ Tang และคณะสามารถสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน สีแดงและสีเหลืองได้ ซึ่งสีที่แตกต่างกันของซิลเวอร์คอลลอยด์เป็นผลมาจากการเติมปริมาณสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้เป็นรีดิวซ์แตกต่างกัน ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ได้มีรูปร่างแตกต่างกันคือ อนุภาคทรงนาโนปริซึม (สีน้ำเงิน) และอนุภาคทรงกลม (สีแดงและสีเหลือง) นอกจากนี้เมื่อนำซิลเวอร์คอลลอยด์มาย้อมผ้าขนสัตว์ พบว่าสามารถย้อมสีผ้าขนสัตว์ได้ด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีค่าความเป็นกรด – ต่างเท่ากับ 4 โดยสีของผ้าขนสัตว์มาจากสีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เคลือบอยู่บนผิวด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และที่ค่าความเป็นกรด – ต่างเท่ากับ 3 อนุภาคนาโนซิลเวอร์จะถูกละลายจนหมด ทำให้สีของซิลเวอร์คอลลอยด์เปลี่ยนเป็นไม่มีสี ซึ่งผ้าขนสัตว์ที่ผ่านการย้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์จะมีสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli* ได้ดี

ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 Tang และคณะ^[24] ได้ศึกษาการย้อมสีเส้นใยฝ้ายด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์สีน้ำเงิน สีแดงและสีเหลือง พบว่าเส้นใยฝ้ายมีประจุที่ผิวเป็นลบจึงไม่สามารถเคลือบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีประจุที่ผิวเป็นลบเช่นเดียวกันได้ ดังนั้นจึงปรับผิวของเส้นใยฝ้ายด้วยการเคลือบสารพอลิไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (poly(diallyldimethylammonium chloride): PDDA) ที่มีประจุเป็นบวก ซึ่งหลังจากปรับผิวเส้นใยฝ้ายด้วย PDDA แล้วพบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถ

เคลือบบนผิวของเส้นใยฝ้ายได้ด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ทำให้เส้นใยฝ้ายมีสีส้มตามสีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และเส้นใยฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีความคงทนของสีต่อซักล้างอยู่ในเกณฑ์ที่ดี



รูปที่ 2.11 แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ระหว่างเส้นใยขนสัตว์ที่มีประจุที่ผิวเป็นบวกกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีประจุที่ผิวเป็นลบ^[23]



รูปที่ 2.12 แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ระหว่างเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการปรับผิวด้วย PDDA ให้มีประจุที่เป็นบวกกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีประจุที่ผิวเป็นลบ^[24]

ต่อมาในปี ค.ศ.2013 Tang และคณะ^[25] ได้สังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีหลายสีส้นมากขึ้น ได้แก่สีน้ำเงิน ม่วง แดง ส้ม และเหลือง โดยสีที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากการเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน แล้วนำซิลเวอร์หลากสีส้นที่ได้มาข้อมใยไหม พบว่าสามารถข้อมสีเส้นใยไหมได้เมื่อปรับค่าความเป็นกรด - ด่างของซิลเวอร์คอลลอยด์ให้มีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถเคลือบบนผิวของเส้นไหมได้ด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต โดยเส้นใยไหมที่ผ่านการข้อมสีจะมีสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli* ได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถผสมสีระหว่างซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีสีต่างกันเพื่อให้ได้สีที่หลากหลายมากขึ้น ซึ่งสีที่ได้จากการผสมสามารถข้อมติดสีบนเส้นใยไหมได้เดียวกัน อีกทั้งยังมีการศึกษาการเพิ่มความคงทนของสีต่อการซักล้างของเส้นใยไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยการเคลือบผิวด้วยพอลิไดเมทิลไซโลเซน (polydimethylsiloxane: PDMS) พบว่า PDMS สามารถเพิ่มความคงทนของสีต่อการซักล้างของเส้นใยไหมได้ โดยที่ความแข็งแรงของเส้นใยไหมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

ในปี ค.ศ. 2016 Jafari และคณะ^[26] ศึกษาผลของขนาดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ต่อสีและสมบัติการต้านแบคทีเรียของผ้าไหมและผ้าฝ้าย พบว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ที่ขนาดแตกต่างกันลงบนผ้าไหมและผ้าฝ้ายด้วยวิธีอัลตราโซนิก โดยอนุภาคซิลเวอร์ที่มีขนาดต่างกันจะแสดงสีต่างกัน ทำให้ผ้าไหมและผ้าฝ้ายเสมือนถูกข้อมด้วยสีที่ต่างกัน โดยสมบัติต้านแบคทีเรียของผ้าไหมและผ้าฝ้ายจะลดลง เมื่อเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้การเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ยังช่วยเพิ่มสมบัติการป้องกันแสงยูวีแก่ผ้าไหมและผ้าฝ้ายได้อีกด้วย

ในปี ค.ศ. 2018 Mahmud และคณะ^[27] ศึกษาสมบัติการต้านแบคทีเรียและสมบัติการป้องกันรังสียูวีของผ้าขนสัตว์ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการทางชีวภาพ โดยอาศัยโซเดียม อัลจิเนต (sodium alginate) ที่สกัดจากสาหร่ายสีน้ำตาลเป็นตัวรีดิวซ์ พบว่าผ้าขนสัตว์ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการทางชีวภาพสามารถต้านแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. และ *E. coli*. ได้ โดยมีค่าร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียมากกว่าร้อยละ 90 และการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ยังสามารถช่วยลดค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงยูวีให้แก่ผ้าขนสัตว์ได้อีกด้วย โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เคลือบลงบนผ้าขนสัตว์ พบว่าค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงยูวีจะมีค่าลดลง

2.3 ไททาเนียม (Titanium dioxide: TiO_2)

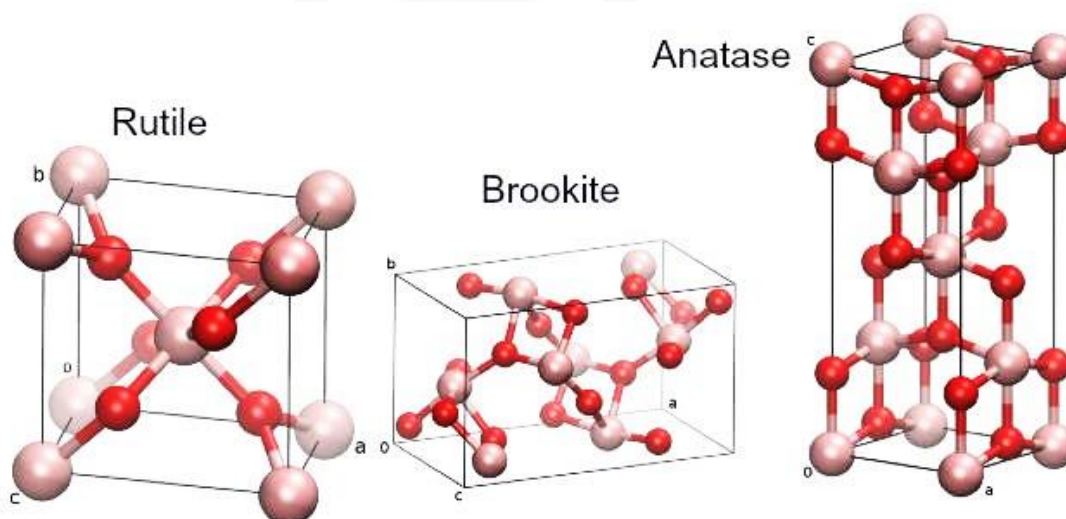
ไททาเนียมหรือไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียมและเป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่มีสมบัติพิเศษทางแสงซึ่งมีคุณสมบัติ เฉพาะแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเฉพาะของไททาเนียม^[28]

คุณสมบัติ	
มวลโมเลกุล	79.9 กรัม/โมล
ความหนาแน่น	3.84 – 4.26 g/cm^3
จุดเดือด	2,500 $^{\circ}\text{C}$
จุดหลอมเหลว	1,850 $^{\circ}\text{C}$
สถานะ	เป็นของแข็งสีขาว

ไททาเนียมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามโครงสร้างของผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยสมบัติของไททาเนียมทั้งสามชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

- 1) รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (tetragonal) มีความคงทนและเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง
- 2) อนาเทส (anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (tetragonal)
- 3) บรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างผลึกของไททาเนียม^[29]

ตารางที่ 2.4 สมบัติต่าง ๆ ของไททาเนียที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน^[30]

สมบัติ	รูไทล์	อนาเทส	บรูคไคท์
โครงสร้างผลึก	เททระโกนัล	เททระโกนัล	ออร์โธโรมบิก
แถบช่องว่างพลังงาน	3.0 eV	3.2 eV	3.2 eV
ความหนาแน่น	4.27 g/cm ³	3.90 g/cm ³	4.13 g/cm ³
ดัชนีหักเห	2.75	2.52	2.63

โดยทั่วไปสารตัวนำและกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่ 2 แถบ คือ แถบวาเลนซ์ (valence band: VB) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band: CB) ซึ่งในสารกึ่งตัวนำจะมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap energy) คั่นอยู่ระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.2 eV ส่วนค่าแถบช่องว่างพลังงานของรูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.0 eV เนื่องจากแถบวาเลนซ์ของอนาเทสและรูไทล์นั้นอยู่ที่ระดับชั้นเท่ากัน ส่วนแถบการนำไฟฟ้าของอนาเทสอยู่สูงกว่าของแถบรูไทล์ 0.2 eV ส่งผลให้อนาเทสมีความแรงในการรีดิวซ์มากกว่า จึงทำให้มีสมบัติทางโฟโตคะตะลิสต์ที่ดีกว่าและมีค่าแอกทิวิตีที่สูงกว่า

นอกจากนี้รูไทล์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานน้อยกว่าอนาเทส เมื่ออิเล็กตรอนในผลึกรูไทล์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะสามารถกลับมารวมตัวกับโฮล (recombination) ได้รวดเร็ว จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นไปได้ในช่วงเวลาสั้น ๆ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพต่ำ อีกทั้งอนาเทสยังเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกสูงและมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดสมบัติทางโฟโตคะตะลิสต์

ในปัจจุบันพบว่าไททาเนีย ที่มีชื่อทางการค้าว่า P25 ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟสทั้งอนาเทส (80%) และรูไทล์ (20%) นั้น สามารถแสดงสมบัติทางโฟโตคะตะลิสต์ได้มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจาก P25 ประกอบด้วยอนาเทสและรูไทล์ในสัดส่วนที่เหมาะสม ส่งผลให้รูไทล์ที่มีชั้นแถบการนำไฟฟ้าอยู่ที่ระดับต่ำกว่าอนาเทสทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron sink) ที่เกิดจากชั้นแถบการนำไฟฟ้าของอนาเทส จึงสามารถช่วยลดการเกิดการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้

2.3.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนีย^[31-34]

ไททาเนียเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยโฟตอน (photon) ที่มีพลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (band gap energy = 3.2 eV) จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (valence band) จะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) เกิดเป็นโฮลที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งพลังงานที่มากพอในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยานี้มาจากแหล่งกำเนิดแสงในช่วงยูวี (UV light) ที่มีความยาว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.7

$$E = hc/\lambda \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล

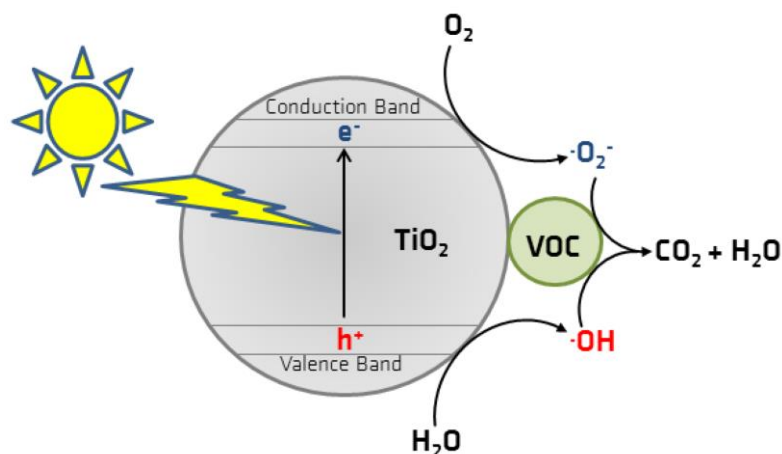
h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} , จูล - วินาที

c คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 , เมตร/วินาที

λ คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร

ดังนั้น เมื่อ $E = 3.2 \text{ eV}$ จะได้ $\lambda = 388$ นาโนเมตร

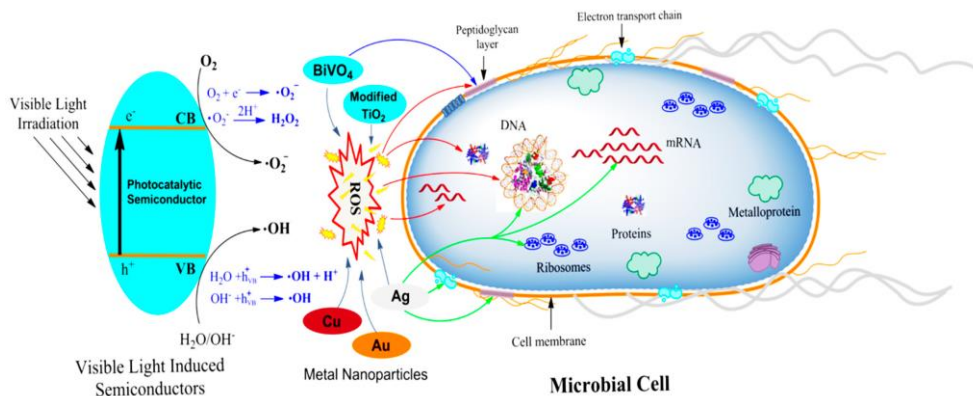
ซึ่งระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงจะต้องเกิดกระบวนการอย่างน้อยสองกระบวนการนี้พร้อมกันเพื่อผลิต reactive oxidizing species (ROS) โดยอิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้นที่แถบการนำไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่อยู่ผิวและเกิดเป็น super oxide radical ($O_2^{\bullet -}$) ส่วนโฮล (h^+) ที่ แถบวาเลนซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำที่ดูดซับที่ผิวเกิดเป็น hydroxyl radicals ($\bullet OH$) ซึ่ง radical ที่เกิดขึ้นจะมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีพลังสูง (high oxidizing power) ทำให้มันมีประสิทธิภาพสูงในการสลายพวงสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (volatile organic compounds, VOCs) ที่มาสัมผัสกับผิวไททาเนีย โดยหลักการสลายสารอินทรีย์จะได้ผลผลิตจากปฏิกิริยาเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายเป็นขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนีย^[35]

2.3.2 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของไททาเนีย^[36]

เมื่อมีพลังงานแสงที่มากกว่า 3.2 eV มากระตุ้นไททาเนีย จะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (valence band) จะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) เกิดเป็นโฮลที่แถบวาเลนซ์ โดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดดิคัล ส่วนโฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดดิคัล ซึ่งอนุมูลทั้งสองตัวถือว่าเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส หรือจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด ซึ่งกลไกการต้านแบคทีเรียของอนุภาคนาโนไททาเนียจะแตกต่างจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์ พบว่าการย่อยสลายเชื้อแบคทีเรียจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของไททาเนีย โดยอนุมูลที่เกิดจากปฏิกิริยาหลังการกระตุ้นด้วยแสง เช่น อนุมูลออกซิเจนที่ว่องไว (reactive oxygen species, ROS) จะทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของเชื้อแบคทีเรีย ทำให้เซลล์แตกเป็นเหตุให้เชื้อแบคทีเรียตายในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งไททาเนียสามารถทำลายแบคทีเรียได้โดยไม่เหลือซาก จึงช่วยลดการเกิดเชื้อโรคตามมาหลังการทำลายเชื้อแบคทีเรียได้

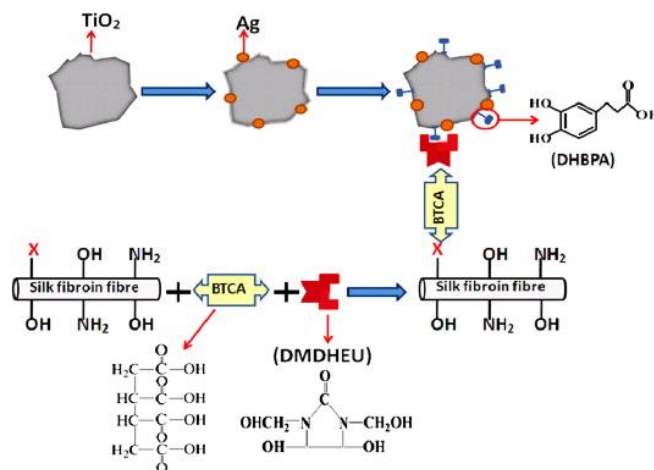


รูปที่ 2.15 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง^[36]

2.3.3 การประยุกต์ใช้ไททาเนียกับสิ่งทอ

นอกจากสมบัติการต้านแบคทีเรียแล้ว ไททาเนียยังถูกนำมาใช้เพิ่มสมบัติอื่นของสิ่งทอได้ เช่น สมบัติการป้องกันรังสียูวี การเพิ่มสมบัติเชิงกล และการทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning)

ในปี ค.ศ. 2011 Li และคณะ^[37] ได้ศึกษาการเพิ่มสมบัติการป้องกันรังสียูวีแก่ผ้าไหมด้วย ไททาเนียและอนุภาคนาโนไททาเนียกับซิลเวอร์ พบว่าไททาเนียและอนุภาคนาโนไททาเนียกับซิลเวอร์สามารถเคลือบบนผิวผ้าไหมที่ผ่านการปรับผิวได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของ DHBPA ((dyhydroxyphenyl)propionic acid) กับหมู่ไฮดรอกซิลของ DMDHEU (Dimethyloldihydroxyethyleneurea) โดยมีกรด BTCA (butanetetracarboxylic) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งการเคลือบด้วยไททาเนียและอนุภาคนาโนไททาเนียกับซิลเวอร์ทำให้ผ้าไหมมีสมบัติป้องกันรังสียูวีได้ดีและมีสมบัติต้านแบคทีเรียชนิด *E. coli*, *S. aureus*, และ *P. aeruginosa*



รูปที่ 2.16 การเคลือบไททาเนียและอนุภาคนาโนไททาเนียกับซิลเวอร์บนผ้าไหมที่ผ่านการปรับผิว^[37]

ในปี ค.ศ. 2014 Rahman และคณะ^[38] ศึกษาสมบัติของผ้าฝ้ายหลังการเคลือบด้วยไททาเนียด้วยวิธีแพดดิ้ง (padding) พบว่าการเคลือบด้วยไททาเนียช่วยลดการเปียกน้ำ ช่วยเพิ่มความทนต่อสภาวะกรด และช่วยเพิ่มความแข็งแรงต่อแรงดึงของผ้าของผ้าฝ้าย แต่ความยืดหยุ่นของผ้ามีค่าลดลง

ในปี ค.ศ. 2015 Doganli และคณะ^[39] ศึกษาความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองของผ้าฝ้ายต่อคราบสีชาและสมบัติการต้านแบคทีเรีย พบว่าเมื่อทำการฉายแสงยูวีแก่ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยไททาเนีย คราบสีชาที่เปื้อนติดบนผ้าฝ้ายมีสีจางลง เนื่องจากการเกิดการสลายสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง แสดงว่าการเคลือบด้วยไททาเนียช่วยเพิ่มความสามารถให้แก่ผ้าฝ้ายได้ อีกทั้งผ้าฝ้ายยังมีสมบัติต้านแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus* อีกด้วย

ในปี ค.ศ. 2017 Jafari-Kiyan และคณะ^[40] ศึกษาการเติมไททาเนียร่วมกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์สีน้ำเงิน สีเหลืองและสีน้ำตาลแล้วเคลือบลงบนผ้าฝ้าย พบว่า การเติมอนุภาคนาโนไททาเนียไม่ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์เปลี่ยนสี โดยผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียแสดงสมบัติการป้องกันรังสียูวีได้ดี มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองได้และสามารถต้านแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus* ได้ 100%

2.4 สารยึดติดพอลิอะคริลิก (Polyacrylic binder)

สารยึดติดพอลิอะคริลิกเป็นสารที่มีส่วนประกอบของกรดพอลิอะคริลิก (Polyacrylic binder) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีโครงสร้างเส้นสายเป็นแบบอะแทกติก (Atactic) คือ โมเลกุลมีกิ่งหรือแขนงไม่แน่นอน ทำให้มีความโปร่งใสมาก โดยร้อยละการส่องผ่านของแสงมีค่าประมาณร้อยละ 92 นิยมนำมาใช้สารเคลือบผิวสิ่งทอและพอลิเมอร์

ในปี ค.ศ. 2017 Nadiger และคณะ^[42] ศึกษาการเคลือบผิวด้วยสารยึดติดอะคริลิกบนผ้าไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ พบว่าการเคลือบด้วยสารยึดติดอะคริลิกช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์บนผ้าไหม ซึ่งอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าไม่มีการสร้างพันธะใดๆกับไฟโบรอินของผ้าไหม และสารยึดติดอะคริลิกไม่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านแบคทีเรียของผ้าไหม แต่ช่วยเพิ่มความติดทนของอนุภาคนาโนซิลเวอร์หลังผ่านการซักแห้ง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน และการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียด้วยวิธีจุ่มแช่ (impregnation method) แสดงในตารางที่ 3.1 – 3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน

สารเคมี	สูตรเคมี	ผู้ผลิต
ซิลเวอร์ไนเตรต	AgNO_3	SRL Chemicals
ไตรโซเดียมซิเตรต	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	Sigma – Aldrich
โซเดียมบอโรไฮไดรด์	NaBH_4	Sigma – Aldrich
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	H_2O_2	Merck

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการเคลือบเส้นไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียด้วยวิธีจุ่มแช่

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	สูตรเคมี	ผู้ผลิต
กรดแอสซิติค	-	CH_3COOH	Merck
ไททาเนีย	(P25)	TiO_2	Degussa
สารยึดติดพอลิอะคริลิก	RUCO-PLAST PCA	-	RUDOLF GROUP

3.1.2 อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีปฏิกิริยาเคมี และการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียด้วยวิธีจุ่มแช่ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน และการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททานีด้วยวิธีจุ่มแช่

อุปกรณ์และวัสดุ	ผู้ผลิต	รายละเอียด
กระดาษชั่งสาร	Whiteman	10x 10 cm.
ปิ๊งเกอร์	- Pyrex - Duran	- 50 ml, 1000 ml - 25 ml, 150 ml, 250 ml
กระบอกตวง	Witeg	10 ml, 25 ml, 100 ml, 250 ml
Magnetic bar	Cowie	20 x 7 mm., 40 x 8 mm.
Magnetic stirrer hot plate	IKA	รุ่น C-MAG HS 7
Magnetic stirrer	DILIGENT	รุ่น ST-Power
Micropipette	BOECO Germany	1,000 μ l
Micropipette tip (1,000 μ l)	Hycon	-
pH meter	METTLER TOLEDO	รุ่น Seven Compact S220
pH Electrode	METTLER TOLEDO	รุ่น InLab Expert Pro – ISM
Ultrasonic processor	Elma	Transsonic 310
เส้นด้ายไหม	Natural Niche Co., Ltd	27/29 D ควบ 4 เกลียว 370 – 400 TPM ฟอกขาว

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์

การสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีสีแตกต่างกันด้วยวิธีปฏิกิริยารีดักชัน โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ดังต่อไปนี้^[19, 21, 25]

- 1) ผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.45 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมบอโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในปริมาตรที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.1 – 1.5 มิลลิลิตร แล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) เป็นเวลาประมาณ 10 นาที ณ อุณหภูมิห้อง

- 2) เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) ปริมาตร 0.06 มิลลิลิตร ลงในสารที่เตรียมในข้อ 1) หลังจากผ่านไปประมาณ 10 นาที จะได้ซิลเวอร์คอลลอยด์สีแตกต่างกันตั้งแต่สีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลือง
- 3) เก็บตัวอย่างซิลเวอร์คอลลอยด์ที่สังเคราะห์ได้ในขวดแก้ว

3.3 กระบวนการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์

การย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์โดยกระบวนการจุ่มแช่ ในงานวิจัยนี้ปรับมาจากกระบวนการของ Tang^[25] โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) วัดค่าความเป็นกรดต่างของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่เตรียมได้ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด - ต่าง (pH meter) แล้วปรับความเป็นกรดของซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยกรดแอสติกให้มีค่าเท่ากับ 5
- 2) นำเส้นด้ายไหมแช่ลงในซิลเวอร์คอลลอยด์ โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเส้นด้ายไหมต่อซิลเวอร์คอลลอยด์เป็น 1:200 ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15, 30, 60 นาที
- 3) นำเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมสีล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI) เพื่อกำจัดอนุภาคส่วนเกิน จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้เส้นด้ายไหมแห้ง

3.4 กระบวนการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย

การเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียในงานวิจัยนี้ปรับมาจากกระบวนการของ Jafari-Kiyan^[40] โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) วัดค่าความเป็นกรดต่างของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่เตรียมได้ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด - ต่าง แล้วปรับความเป็นกรดของซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยกรดแอสติกให้มีค่าเท่ากับ 5
- 2) เติมอนุภาคนาโนไททาเนียร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของเส้นด้ายไหมลงในซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 5 แล้วนำสารผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียในอ่างอัลตราโซนิกเพื่อให้อนุภาคเกิดการกระจายตัว จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน (Magnetic stirrer hot plate) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ประมาณ 10 นาที แล้วนำมาพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง
- 3) นำเส้นด้ายไหมแช่ลงในสารผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียโดยกำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเส้นด้ายไหมต่อสารเคลือบเป็น 1:200 ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที โดยการแช่ผ่านอ่างอัลตราโซนิก

- 4) นำเส้นด้ายไหมที่ผ่านการเคลือบล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อกำจัดอนุภาคส่วนเกิน จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้เส้นด้ายไหมแห้ง

3.5 กระบวนการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยสารยึติดิตตพอลิอะคริลิก (PCA)

- 1) เติมสารยึติดิตตพอลิอะคริลิก (PCA) ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของเส้นด้ายไหม ลงในน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน กำหนดสถานะของสารเคลือบให้มีค่าความเป็นกรด – ด่างประมาณ 5 – 6 โดยการปรับด้วยกรดแอสติก
- 2) นำเส้นด้ายไหมแช่ในสารละลายสารเคลือบ PCA นาน 20 นาที ณ อุณหภูมิ 30 – 40 องศาเซลเซียส
- 3) จากนั้นนำเส้นด้ายไหมไปต้ม (curing) ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

3.6 การวิเคราะห์ผลและทดสอบสมบัติ

3.6.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในซิลเวอร์คอลลอยด์ เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในคอลลอยด์ที่มีสีแตกต่างกัน รวมถึงศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคในสารผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททานี โดยเครื่อง Transmission electron microscope (TEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-1400 โดยใช้ความต่างศักย์ที่ 120 kV

3.6.2 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วย UV/Vis Spectrophotometers ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น LAMBDA 35 ที่ช่วงความยาวคลื่น 300 - 900 นาโนเมตร เพื่อศึกษาสีและสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในซิลเวอร์คอลลอยด์ ซึ่งอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีรูปร่างและขนาดที่ต่างกัน จะแสดงสมบัติการดูดกลืนแสงและการกระเจิงแสงที่ต่างกัน เนื่องจากสมบัติ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) ทำให้ได้ซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีสีที่หลากหลายน

3.6.3 การวิเคราะห์ค่าศักย์เซต้า (Zeta potential)

วิเคราะห์ค่าศักย์เซต้าของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในซิลเวอร์คอลลอยด์และของเส้นด้ายไหม เพื่อศึกษาประจุที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์และของเส้นด้ายไหม ณ ค่าความเป็นกรด – ด่างที่

แตกต่างกัน โดยใช้เครื่อง Zetasizer ยี่ห้อ MALVERN รุ่น Zetasizer Nano ZSP ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังต่อไปนี้

3.6.3.1 การวิเคราะห์ค่าศักย์เซต้า (Zeta potential) สำหรับซิลเวอร์คอลลอยด์

ซิลเวอร์คอลลอยด์ที่สังเคราะห์ได้ในข้อ 3.2 มีค่าความเป็นกรด - ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 9 จากนั้นทำการปรับค่าความเป็นกรด - ด่างของซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยกรดแอสติก โดยการหยดทีละหยดแล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย แล้วเลือกเก็บตัวอย่างที่ค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 9, 7, 5 และ 4 แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zetasizer

3.6.3.2 การวิเคราะห์ค่าศักย์เซต้า (Zeta potential) สำหรับเส้นด้ายไหม^[25]

- 1) ตัดเส้นด้ายไหมให้มีขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร
- 2) จากนั้นนำเส้นด้ายไหม 0.1 กรัม และน้ำปราศจากไอออน 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในหม้อบด (หม้อบดเซอริโคเนียขนาด 70 มิลลิลิตร, ลูกบดเซอริโคเนียที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 มิลลิเมตร น้ำหนัก 30 กรัม) แล้วทำการบดเปียกเส้นด้ายไหมด้วยความเร็วรอบ 500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 3) เมื่อบดเสร็จแล้วจะได้ตัวอย่างเป็นผงเส้นด้ายไหมกระจายตัวในน้ำ จากนั้นปรับค่าความเป็นกรด - ด่างด้วยกรดแอสติก โดยการหยดทีละหยดแล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ทำการเก็บตัวอย่างที่ค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 7, 6, และ 4 แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zetasizer

3.6.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

การศึกษาองค์ประกอบเฟสของอนุภาคนาโนไททาเนีย (P25) จาก Degussa โดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น D8-Advance โดยใช้ Cu K α radiation ($\lambda = 1.5404 \text{ \AA}$) ความต่างศักย์ 40 kV กระแสไฟฟ้า 40 mA และช่วง 2theta เท่ากับ 20° - 80°

3.6.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและพันธะเคมี

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันและพันธะเคมีของเส้นด้ายไหมด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectroscope (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One โดยวิเคราะห์แบบ Attenuated total reflectance (ATR-FTIR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 4000 nm

3.6.6 การวิเคราะห์ความเข้มสี (color strength)^[44]

ความเข้มสี (color strength) ในวัสดุสิ่งทอจะใช้เทคนิคการวัดการสะท้อนของแสงที่วิเคราะห์ได้จากค่า K/S ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณจากค่าการสะท้อนแสงตามทฤษฎีของ Kubelka-Munk ดังสมการที่ 3.1 ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Color-Eye 7000A spectrophotometer ยี่ห้อ GretagMacbeth กำหนดความยาวคลื่นในช่วง 360 – 750 นาโนเมตร

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

เมื่อ R = ค่าการสะท้อนแสงของชิ้นตัวอย่าง

K = ค่าการดูดกลืนแสงของชิ้นตัวอย่าง

S = ค่าการกระเจิงแสงของชิ้นตัวอย่าง

สำหรับงานวัสดุสิ่งทอจะถือว่าไม่มีการกระเจิงแสงในวัสดุที่ย้อมติดสี เนื่องจากสีที่ใช้ย้อมจะละลายเข้าไปเป็นเนื้อเดียวกันกับสิ่งทอ ดังนั้นค่า K และ S ของสีและของสิ่งทอจึงเป็นค่าเดียวกัน ซึ่งในกรณีที่ย้อมและเคลือบสิ่งทอด้วยอนุภาค สามารถใช้ K/S ในการวิเคราะห์ความเข้มสีและการเคลือบติดของอนุภาคบนผิวสิ่งทอได้ โดยถ้าค่า K/S มีค่าสูง แสดงว่าสามารถย้อมติดสีได้ดี และมีการเคลือบติดของอนุภาคได้ดี^[14, 25]

3.6.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททานเนียมบนผิวของเส้นด้ายไหมด้วยเครื่อง Field emission scanning electron microscope (FESEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7001F ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) โดยใช้ความต่างศักย์ที่ 10 kV

ศึกษาโครงสร้างจุลภาพของไททานเนียมด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400LV โดยใช้ความต่างศักย์ที่ 15 kV

3.6.8 การทดสอบสมบัติการต้านแบคทีเรีย

3.6.8.1 การทดสอบสมบัติการต้านแบคทีเรียของซิลเวอร์คอลลอยด์^[45]

ทดสอบสมบัติการต้านแบคทีเรียตามมาตรฐาน ASTM E2149-10 โดยการเจือจางสารแขวนลอยเชื้อทดสอบ ได้แก่ *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ให้ได้จำนวนเชื้อทดสอบตั้งต้นที่ 10^6 CFU ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีซิลเวอร์คอลลอยด์อยู่ จากนั้นทำการเขย่าให้ซิลเวอร์คอลลอยด์ผสมกับเชื้อ

แบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วดูสารแขวนลอยแบคทีเรีย ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ถ่ายลงสู่ร้านอาหารเลี้ยงเชื้อในงานเพาะเชื้อ แล้วเกลี่ยให้ทั่วร้านอาหาร แล้วทำการบ่มงานเพาะเชื้อไว้ในตู้บ่มเพาะเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตการเปลี่ยนแปลงโดยการนับจำนวนโคโลนีที่ยังมีชีวิต เพื่อคำนวณร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียโคโลนี ดังสมการที่ 3.2 และมีการแบ่งระดับความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ดังตารางที่ 3.4

$$\% \text{ Reduction}^{[46]} = \frac{(B-A) \times 100}{B} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

เมื่อ A = จำนวนของแบคทีเรียหลังการทดสอบ (ชั่วโมงที่ 24)

B = จำนวนของแบคทีเรียก่อนการทดสอบ (ชั่วโมงที่ 0)

ตารางที่ 3.4 ระดับความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียโคโลนี	ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
มากกว่าหรือเท่ากับ 99.95	ดีเยี่ยม
99.95 ถึง 99.90	ดี
น้อยกว่า 99.90	ไม่ผ่านเกณฑ์

3.6.8.2 การทดสอบสมบัติการต้านแบคทีเรียของเส้นด้ายไหม^[46, 47]

ทดสอบสมบัติการต้านแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC 100 : 2004 โดยการนำเส้นด้ายไหม 1 กรัม ใส่ลงในสารแขวนลอยเชื้อทดสอบ 1 มิลลิลิตร ได้แก่ *Escherichia coli* (*E. coli.*) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus.*) ที่ผ่านการเจือจางให้ได้จำนวนเชื้อทดสอบตั้งต้นที่ 10^6 CFU จากนั้นทำการเขย่าให้ตัวอย่างสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วดูสารแขวนลอยแบคทีเรียปริมาตร 100 ไมโครลิตร ถ่ายลงสู่ร้านอาหารเลี้ยงเชื้อในงานเพาะเชื้อ แล้วเกลี่ยให้ทั่วร้านอาหาร แล้วทำการบ่มงานเพาะเชื้อไว้ในตู้บ่มเพาะเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นร้อยละ 90 สังเกตการเปลี่ยนแปลงโดยการนับจำนวนโคโลนีที่ยังมีชีวิต เพื่อคำนวณหาร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียโคโลนี ดังสมการที่ 3.2

3.6.9 การทดสอบความคงทนของสี (Color fastness)

3.6.9.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Color fastness to washing) ทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างตามมาตรฐาน ISO 105-C01: 1989 (E) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ตัดผ้าหลายเส้นใย (Multifiber adjacent fabric) ขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร โดยผ้าหลายเส้นใยที่ใช้มีรายละเอียดชนิดของเส้นใยตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดผ้าหลายเส้นใย (Multifiber adjacent fabric) ชนิด DW

Diacetate	Bleached Cotton	Polyamide	Polyester	Acrylic	Wool
-----------	--------------------	-----------	-----------	---------	------

- 2) นำเส้นด้ายไหมน้ำหนักเท่ากับ 0.5 เท่าของน้ำหนักผ้าหลายเส้นใยมาวางและวางรวมกันบนผ้าโพลิโพรไพลีน (Polypropylene) โดยต้องเป็นชนิดที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Non-dyeable fabric) ให้ได้ขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร แล้วทำการเย็บมุมทั้ง 4 ด้าน จากนั้นประกบด้วยผ้าหลายเส้นใย และทำการเย็บริมทั้ง 4 ด้าน
- 3) ทำการเตรียมน้ำสบู่มาตรฐาน ในอัตราส่วนน้ำหนักสบู่ 5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เติมน้ำสบู่มาตรฐานลงในกระบอกซัก โดยปริมาณสารละลายน้ำสบู่ที่ใช้คำนวณดังสมการที่ 3.3

$$\text{ปริมาณน้ำสบู่ที่ใช้ (มิลลิเมตร)} = \text{น้ำหนักชิ้นงาน (กรัม)} \times 50 \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

โดยสบู่มาตรฐานจะต้องมีความขุ่นไม่มากกว่าร้อยละ 5 และไม่มีสารจำพวกสารเรืองแสง (fluorescent brightening) โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.6 ส่วนประกอบของสบู่มาตรฐาน

ส่วนประกอบ	รายละเอียด
ด่างอิสระ (Free alkaline) : ปริมาณ Na_2CO_3	ไม่เกิน 3%
ด่างอิสระ (Free alkaline) : ปริมาณ NaOH	ไม่เกิน 0.1%
ไขมันทั้งหมด (Total fatty matter)	ไม่น้อยกว่า 850 g/kg
ค่าไอโอดีน	ไม่เกิน 50

- 4) นำชิ้นงานใส่ลงในกระบอกชกที่มีน้ำสบู่ แล้วปิดฝา จากนั้นใส่กระบอกชกลงในเครื่อง Gyrowash โดยตั้งอุณหภูมิที่ 40 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- 5) ล้างชิ้นงานที่ผ่านการชกด้วยน้ำสะอาด จากนั้นแยกชิ้นงานที่ผ่านการเย็บออก 3 ด้านจาก 4 ด้าน โดยให้เหลือด้านที่สั้นที่สุดเพียง 1 ด้าน แล้วนำไปแขวนตากที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส
- 6) ประเมินผลค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color change) บนชิ้นงานทดสอบหลังจากที่ชิ้นงานทดสอบแห้งแล้ว โดยวัดค่าสีชิ้นงานด้วยเครื่อง Color-Eye 7000A spectrophotometer ยี่ห้อ GretagMacbeth จากนั้นคำนวณหาค่าความแตกต่างของสี (ΔE^*) ตามระบบ CIELAB ดังสมการที่ 3.4

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

- เมื่อ
- L* แทนค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 100
 - a* แทนค่าสีแดง (ค่าเป็น +) – สีเขียว (ค่าเป็น -)
 - b* แทนค่าสีเหลือง (ค่าเป็น +) – สีน้ำเงิน (ค่าเป็น -)

3.6.9.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนีย (Color fastness to photocatalytic activity of TiO₂)^[40]

ทดสอบความคงทนของสีต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนียจากเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยซิลเวอร์และไททาเนียที่มีปริมาณไททาเนียร้อยละ 0, 1, 5 และ 10 ของน้ำหนัก โดยพันเส้นด้ายไหมบนแผ่นแก้ว (glass slide) ให้มีขนาด 1 x 1 นิ้ว จากนั้นนำไปฉายแสงด้วยหลอดยูวียี่ห้อ Philips รุ่น Actinic BL กำลังไฟ 18 วัตต์ ที่มีช่วงความยาวคลื่น 315 – 400 นาโนเมตร (UV – A) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดสีของเส้นด้ายไหมก่อนและหลังฉายแสง ด้วยเครื่อง Color-Eye 7000A spectrophotometer ยี่ห้อ GretagMacbeth จากนั้นนำค่าสีที่ได้มาคำนวณค่าความแตกต่างของสี (ΔE^*) ตามระบบ CIELAB ดังสมการที่ 3.4

3.6.10 การทดสอบความสามารถในการป้องกันรังสียูวี (UV protection)^[46, 48, 49]

ทดสอบความสามารถในการป้องกันรังสียูวี (UV protection) ตามมาตรฐาน AATCC 183-2004 โดยการพันเส้นด้ายไหมบนแผ่นแก้ว (glass slide) ให้มีขนาด 2 x 2 นิ้ว จากนั้นนำไปวัดค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง (Transmittance) ด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometers ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น LAMBDA 35 โดยการใส่โหนด integrating sphere กำหนดความคลื่นช่วง 280

– 400 นาโนเมตร โดยแบ่งเป็น UV-A ช่วง 315 – 400 นาโนเมตร และ UV-B ช่วง 280 – 315 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณค่าความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต UPF (Ultraviolet protection factor) ดังสมการที่ 3.5

$$UPF = \frac{\sum_{280\text{ nm}}^{400\text{ nm}} E_{\lambda} \times S_{\lambda} \times \Delta\lambda}{\sum_{280\text{ nm}}^{400\text{ nm}} E_{\lambda} \times S_{\lambda} \times \Delta\lambda \times T_{\lambda}} \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

เมื่อ E_{λ} = ค่าความเข้มรังสีที่มีผลกระทบต่อผิวหนังมนุษย์

S_{λ} = ความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์

T_{λ} = ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านชิ้นตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ได้

$\Delta\lambda$ = ความยาวคลื่นที่ใช้ทดสอบ (nm)

โดยค่า UPF จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการป้องกันแสงแดดของวัสดุสิ่งทอ ซึ่งการกำหนดค่าความสามารถในการป้องกันรังสีเป็น UPF ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ระดับค่า UPF ในการป้องกันรังสียูวี^[49]

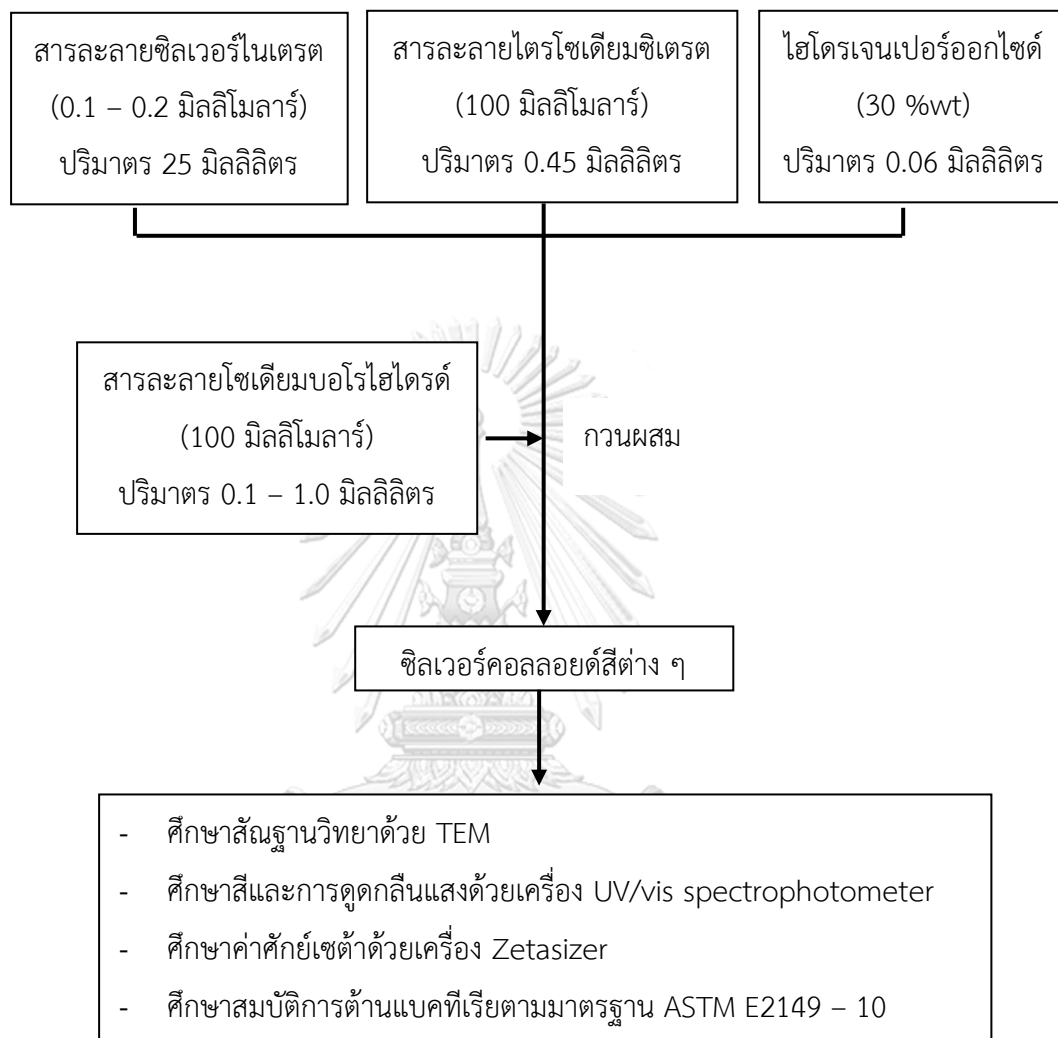
ช่วงค่า UPF	ระดับการป้องกันรังสียูวี	ปริมาณรังสีที่ป้องกันได้
< 15	ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้น้อย	< ร้อยละ 93.3
15 – 24	ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี	ร้อยละ 93.3 – 95.9
25 – 39	ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดีมาก	ร้อยละ 96.0 – 97.4
40 – 50, 50+	ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้สูงสุด	> ร้อยละ 97.4

3.6.12 การทดสอบความแข็งแรงของเส้นด้ายไหม (Yarn strength)

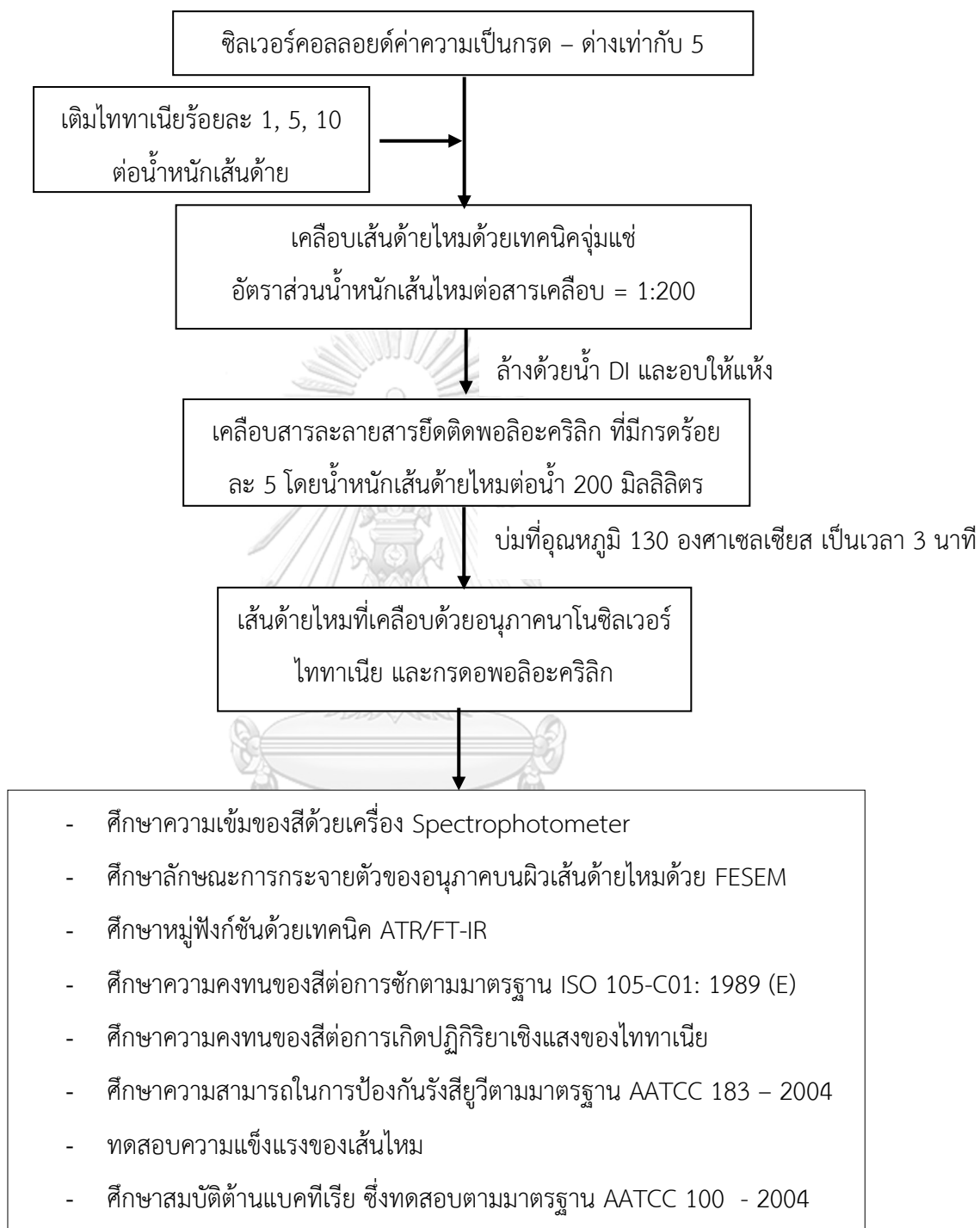
ทดสอบความแข็งแรงทางแรงดึงของเส้นด้ายไหมโดยเปรียบเทียบจากค่าแรงดึงที่จุดขาด (breaking force) โดยเตรียมเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบและที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ไททานีและสารยึดติดพอลิอะคริลิก ความยาว 250 เซนติเมตร จำนวน 50 เส้น นำมาทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Tinius Olsen รุ่น 5ST ใช้แรงถึง 500 นิวตัน กำหนดระยะทดสอบ 50 เซนติเมตร และความเร็วแรงดึง 60 มิลลิเมตรต่อนาที (ความเร็วแรงดึงเท่ากับร้อยละ 120 ของระยะทดสอบ)

3.7 แผนผังงานวิจัย

3.7.1 การสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์



3.7.2 การเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ไททาเนียและสารยึดติดพอลิอะคริลิก



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน

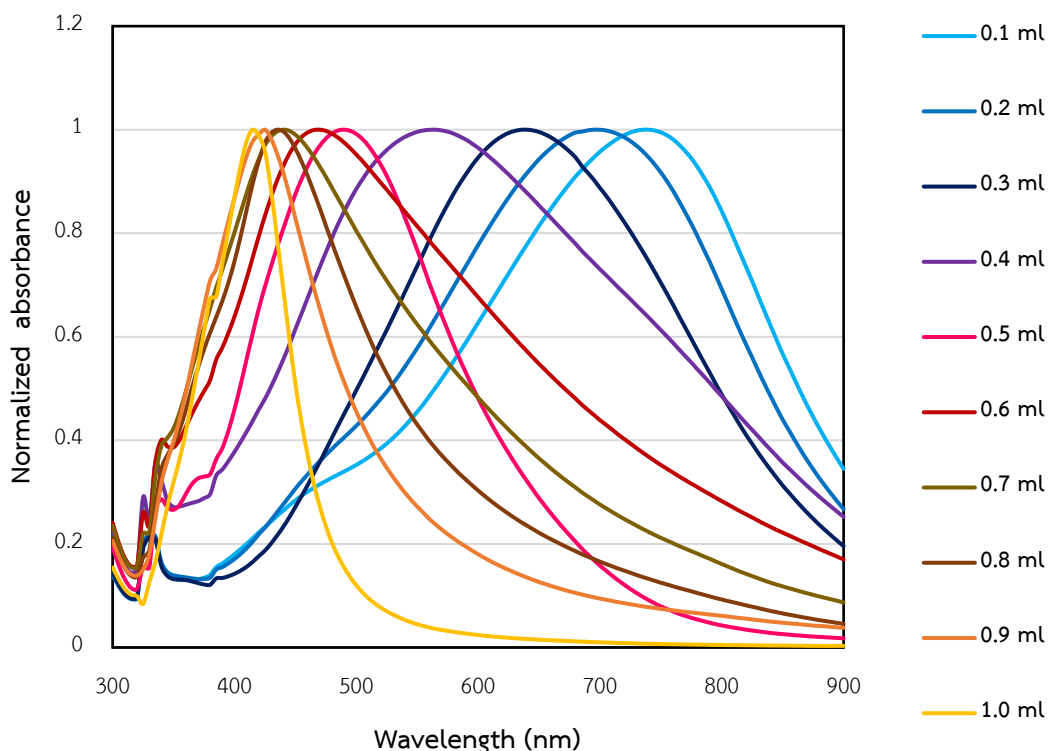
4.1.1 ศึกษาผลของการเติมปริมาณตัวรีดิวซ์ที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาการสังเคราะห์ซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน พบว่าการเติมโซเดียมบอโรไฮไดรด์ (NaBH_4) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.1 – 1.0 มิลลิลิตร ส่งผลให้เกิดซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีสีแตกต่างกัน ไล่จากสีน้ำเงินไปจนถึงเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีที่เติม NaBH_4 ปริมาณ 0.1 – 1.0 มิลลิลิตร

จากการศึกษาสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer แสดงผลเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า ซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีสีแตกต่างกันจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่างกัน โดยตำแหน่งพีคที่ได้จะอยู่ในช่วง 740 – 400 นาโนเมตร ไล่จากสีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลือง ซึ่งช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวคือช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (visible light) โดยเส้นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นของแต่ละซิลเวอร์คอลลอยด์ สามารถใช้อธิบายช่วงสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ได้ เนื่องจากแสงสีที่ตามองเห็นจะเป็นสีผสม (complementary) หรือสีที่อยู่ตรงข้ามของช่วงแสงสีที่ถูกดูดกลืน^[50-54] จากผลการทดสอบซิลเวอร์คอลลอยด์จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างสีน้ำเงินจะแสดงการดูดกลืนช่วงแสงสีแดง (580 – 780 นาโนเมตร) ตัวอย่างสีม่วงจะแสดงการดูดกลืนช่วงแสงสีเขียวและเหลือง (500 – 580 นาโนเมตร) ตัวอย่างสีแดงจะแสดงการดูดกลืนช่วงแสงสีน้ำเงิน (470 – 500 นาโนเมตร) ส่วนตัวอย่างสีน้ำตาล ส้มและเหลืองจะแสดงการดูดกลืนช่วงแสงสีม่วง – น้ำเงิน (380 – 470 นาโนเมตร)

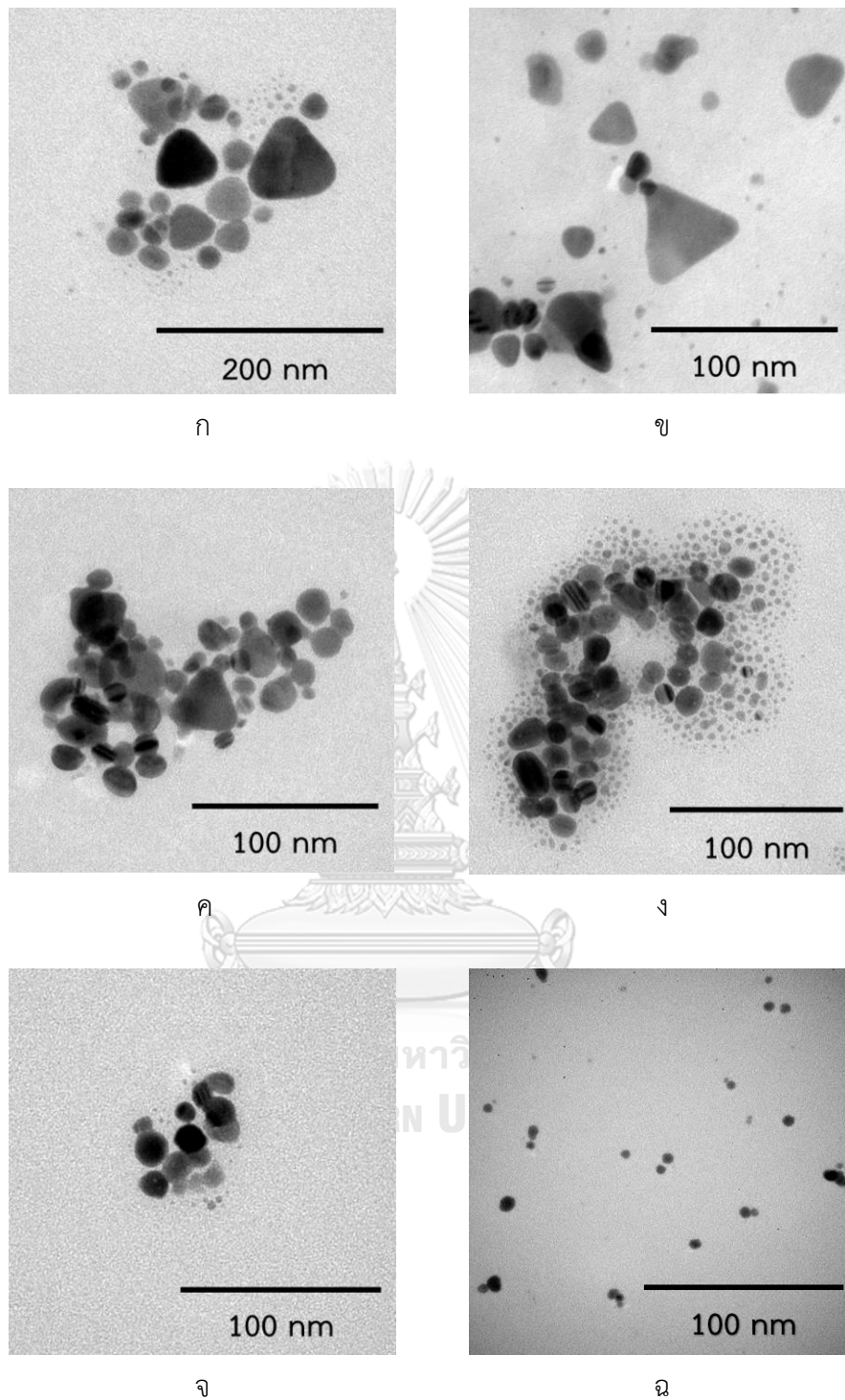


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการดูดกลืนแสง ณ ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีสัณที่เตรียมจาก NaBH_4 ปริมาณต่างๆ

การเกิดสีของซิลเวอร์คอลลอยด์เป็นผลมาจากสมบัติ Localized surface plasmon resonance (LSPR) ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เกิดจากการที่อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงที่มากระตุ้น ทำให้อิเล็กตรอนอิสระเกิดการสั่นรวม (Collective oscillation) ส่งผลให้เกิดการแยกกันของประจุบวกและลบ ซึ่งความแตกต่างของประจุที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแรงดึงกลับตำแหน่งสมดุล (Restoring force) และเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายออกจากตำแหน่งสมดุลจะเกิดการสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance) โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงแสงยูวีถึงแสงที่มองเห็นได้ เมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอน อนุภาคนาโนซิลเวอร์จะเกิดการดูดกลืนแสงและสามารถมองเห็นอนุภาคเป็นสีสัณที่หลากหลายได้ การดูดกลืนแสงของอนุภาคจะแตกต่างกันขึ้นกับรูปร่างหรือขนาดของอนุภาค ดังนั้นเส้นสเปกตรัมของซิลเวอร์คอลลอยด์แต่ละสีสามารถใช้แสดงสมบัติ LSPR ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีรูปร่างหรือขนาดแตกต่างกันได้^[11]

เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในคอลลอยด์ด้วยกล้อง TEM พบว่าซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีสีแตกต่างกัน จะมีรูปร่างหรือขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน (ก: NaBH_4 0.1 มิลลิลิตร) และซิลเวอร์คอลลอยด์สีม่วง (ข: NaBH_4 0.4 มิลลิลิตร) จะมีอนุภาครูปทรงนาโนปริซึม ซิลเวอร์คอลลอยด์สีม่วงแดง (ค: NaBH_4 0.5 มิลลิลิตร) จะมีอนุภาคส่วนใหญ่เป็นทรงกลมและมีอนุภาครูปทรงนาโนปริซึมอยู่เล็กน้อย ส่วนซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำตาล (ง: NaBH_4 0.7 มิลลิลิตร) ซิลเวอร์คอลลอยด์สีส้ม (จ: NaBH_4 0.9 มิลลิลิตร) และซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลือง (ฉ: NaBH_4 1.0 มิลลิลิตร) จะมีอนุภาครูปทรงกลมซึ่งมีขนาดเล็กงตามลำดับ

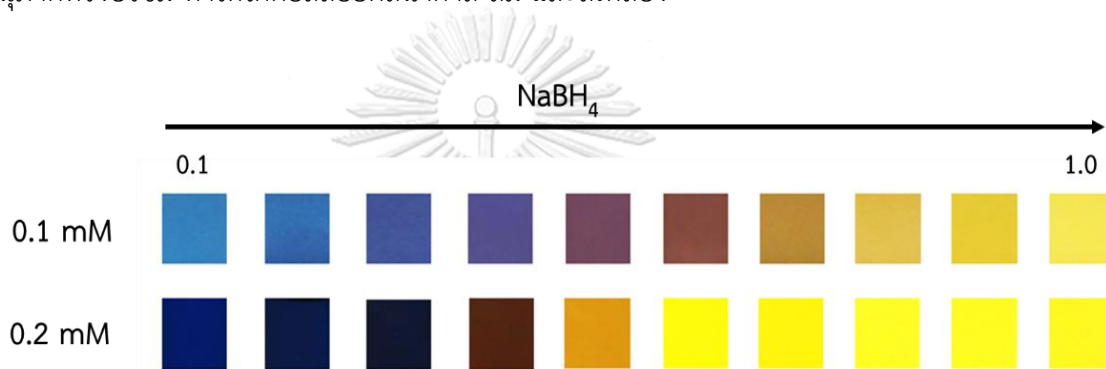
กลไกการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีรูปร่างนาโนปริซึมเป็นผลมาจากซิลเวอร์ไอออนจากสารละลายซิลเวอร์ในเตรตเกิดการจับกับซิเตรตไอออนจากสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ซึ่งซิเตรตไอออนจะจับกับซิลเวอร์ไอออนในบริเวณหน้า $\{111\}$ เท่านั้น เมื่อเติมตัวรีดิวซ์หรือ NaBH_4 ซิลเวอร์ไอออนจะเปลี่ยนเป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีซิเตรตไอออนเกาะอยู่รอบ คอลลอยด์ที่ได้จะเป็นสีเหลือง เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีลักษณะเป็นทรงกลม จากนั้นเมื่อเติม H_2O_2 จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนอนุภาคนาโนซิลเวอร์กลับเป็นซิลเวอร์ไอออน แต่เนื่องจากบริเวณหน้า $\{111\}$ ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีซิเตรตไอออนป้องกันไว้ ทำให้ H_2O_2 ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ บริเวณดังกล่าวได้ ดังนั้นอนุภาคนาโนซิลเวอร์จึงมีรูปร่างปริซึมและเปลี่ยนจากคอลลอยด์สีเหลืองเป็นคอลลอยด์สีน้ำเงิน และเมื่อเพิ่มปริมาณ NaBH_4 มากขึ้น (0.5 – 1.0 มิลลิลิตร) พบว่าการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์รูปทรงนาโนปริซึมลดลง เนื่องจาก NaBH_4 มีความเร็วในการทำปฏิกิริยาที่ไวกว่าซิเตรตไอออน ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ NaBH_4 มากขึ้นจะลดโอกาสการเกาะของซิเตรตไอออนกับซิลเวอร์ไอออน อีกทั้งอัตราการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลมไวกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2O_2 ส่งผลให้เกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลมง่ายขึ้น โทนสีซิลเวอร์คอลลอยด์ภายหลังจึงเป็นสีโทนสีน้ำตาลจนถึงเหลือง^[19-21, 55]



รูปที่ 4.3 ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จากซิลเวอร์คอลลอยด์ (ก) สีน้าเงิน (ข) สีม่วง (ค) สีม่วง-แดง (ง) สีน้าตาล (จ) สีส้ม และ (ฉ) สีเหลือง

4.1.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต

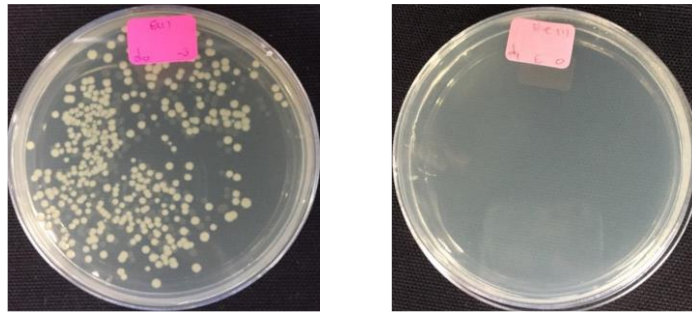
เมื่อลองเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตจากเดิม 0.1 มิลลิโมลาร์ เป็น 0.2 มิลลิโมลาร์ พบว่าการเกิดสีของซิลเวอร์คอลลอยด์เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยมีการเกิดซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลืองมากขึ้น และสีที่ได้มีความเข้มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตทำให้ในระบบมี Ag^+ มากขึ้น จำนวนอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ได้จึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดสีที่เข้มขึ้น และเมื่อเติมปริมาณ NaBH_4 เพิ่มมากขึ้น Ag^+ ที่มีอยู่มากในระบบสามารถทำปฏิกิริยากับ NaBH_4 ได้ง่าย และรวดเร็วกว่าการจับกับซิเตรตไอออน ดังนั้นโอกาสการเกิดอนุภาคทรงกลมจึงมีมากกว่าการเกิดอนุภาคทรงปริซึม ทำให้ได้คอลลอยด์สีน้ำตาล ส้ม และสีเหลือง



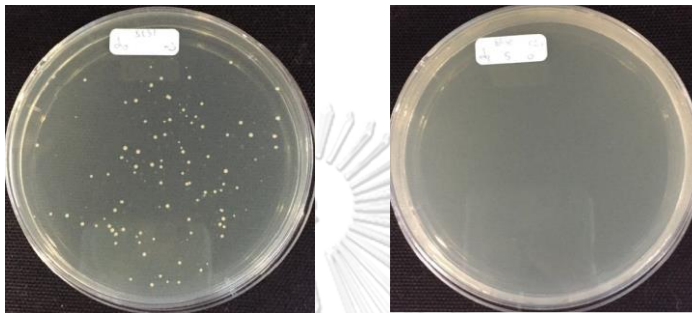
รูปที่ 4.4 การเกิดสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 มิลลิโมลาร์

4.1.3 ศึกษาผลการยับยั้งแบคทีเรียของซิลเวอร์คอลลอยด์

จากการทดสอบสมบัติการต้านแบคทีเรียของซิลเวอร์คอลลอยด์ตามมาตรฐาน ASTM E2149 – 10 ซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินและสีเหลืองสามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli*. และ *S. aureus*. ได้ดีเยี่ยม โดยพบว่าหลังผ่านไป 24 ชั่วโมง งานเพาะเชื้อที่ทดสอบด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินไม่ปรากฏโคโลนีของแบคทีเรียชนิด *E. coli*. (รูป 4.5 ก) และ *S. aureus*. (รูป 4.5 ข) เช่นเดียวกับงานเพาะเชื้อที่ทดสอบด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลืองที่ไม่ปรากฏโคโลนีของแบคทีเรียชนิด *E. coli*. (รูป 4.6 ก) และ *S. aureus*. (รูป 4.6 ข) ซึ่งตัวอย่างทั้งสองมีร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (% Reduction) เท่ากับร้อยละ 100 (รูปที่ 4.7) จึงกล่าวได้ว่าซิลเวอร์คอลลอยด์สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ดีเยี่ยมและลักษณะรูปร่างหรือขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรีย

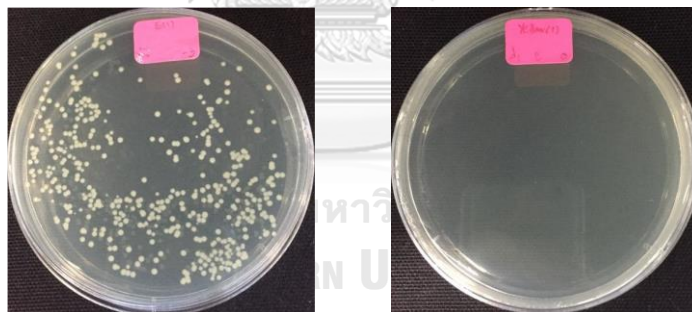


ก

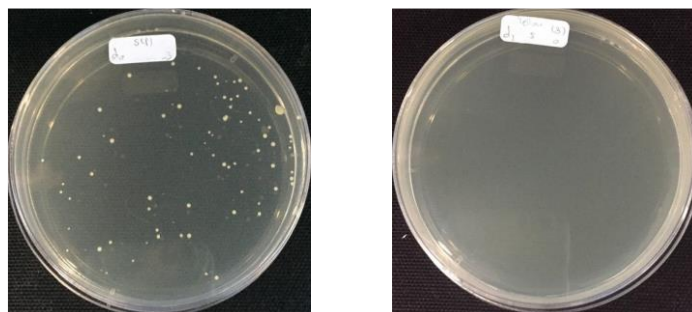


ข

รูปที่ 4.5 จำนวนแบคทีเรีย *E. coli* (ก.) และ *S. aureus*. (ข) ในซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)

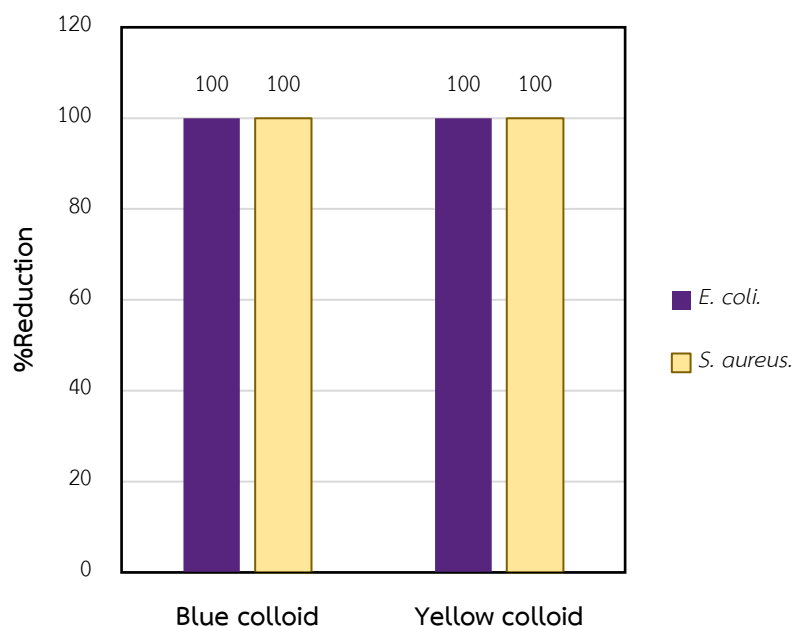


ก



ข

รูปที่ 4.6 จำนวนแบคทีเรีย *E. coli* (ก.) และ *S. aureus*. (ข) ในซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลืองที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)



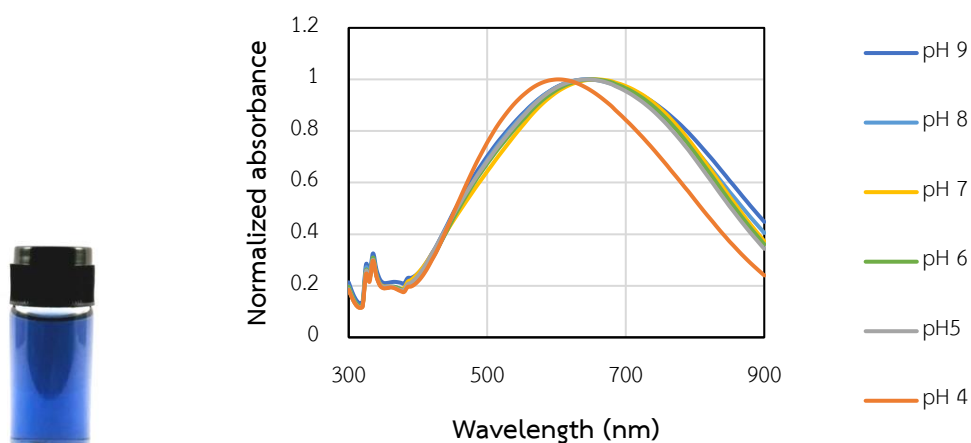
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *E. coli*. และ *S. aureus*. ของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินและสีเหลือง

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์

4.2.1 ศึกษาผลของความเป็นกรด – ด่างต่อการย้อมเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์

เนื่องจากเส้นด้ายไหมเป็นสารประเภทแอมโฟเทอริก (Amphoteric substances) หรือสารที่มีประจุบวกและลบในตัวเดียวกัน โดยไหมสามารถแสดงได้ทั้งประจุบวกและประจุลบขึ้นกับกับสภาวะความเป็นกรด – ด่าง ดังนั้นในการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์จึงจำเป็นต้องศึกษาค่าความเป็นกรด – ด่างของคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการย้อมสี

ซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ใช้ในการทดสอบจะถูกปรับค่าความเป็นกรด – ด่างด้วยกรดแอสติกให้มีค่าตั้งแต่ 4 - 9 โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินในช่วงความยาวคลื่น 620 – 640 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 4 จะมีตำแหน่งพีคต่างจากซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด – ด่างอื่น ๆ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสี ซึ่งจะทำการศึกษาในขั้นต่อไป

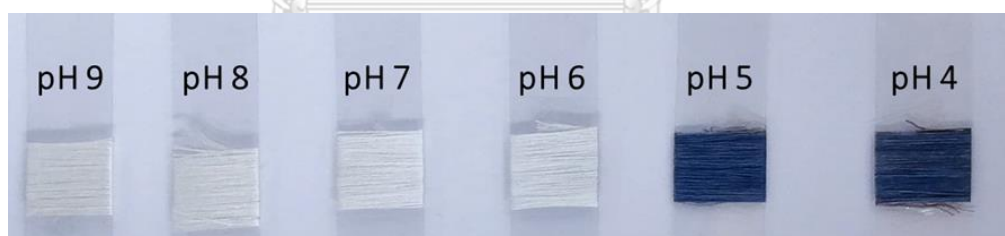


ก

ข

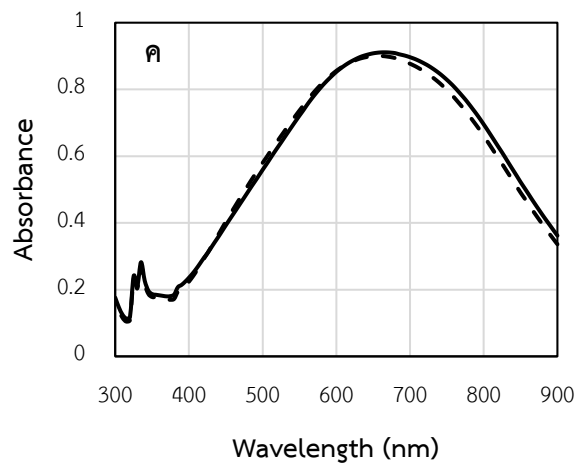
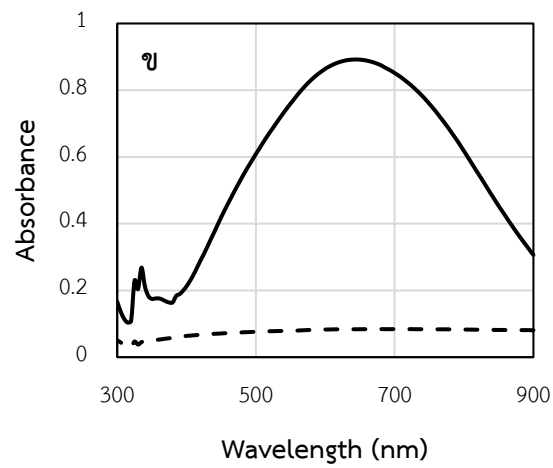
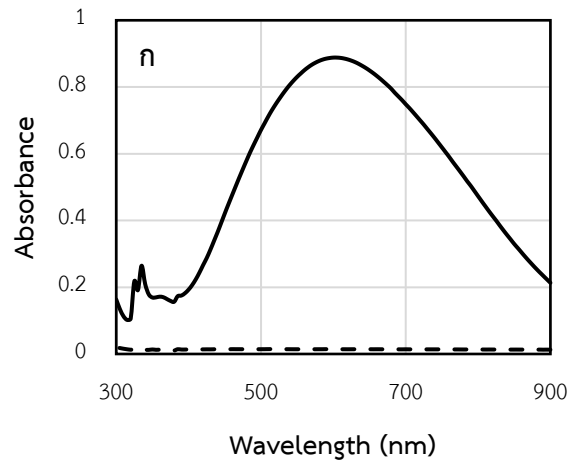
รูปที่ 4.8 (ก) ซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินที่ใช้วัด และ (ข) ค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างต่างๆ

ซึ่งเมื่อนำเส้นด้ายไหมมาแช่ในซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างตั้งแต่ 4 ถึง 9 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเส้นด้ายไหมที่แช่ในซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4 และ 5 สามารถย้อมติดสีได้ ส่วนสีของเส้นด้ายไหมที่แช่ในซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 6 - 9 เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะไม่เห็นถึงความแตกต่างจากเส้นด้ายไหมปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



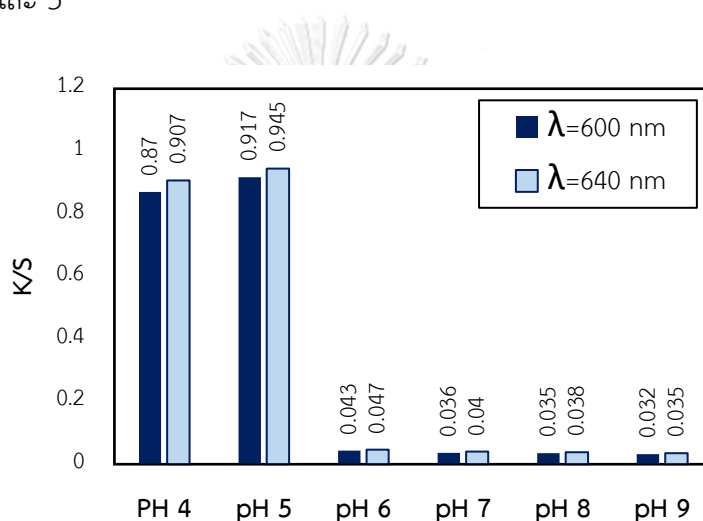
รูปที่ 4.9 เส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านและผ่านการแช่ในซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินที่ pH ต่างๆ

ซึ่งเมื่อทดสอบวัดค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินหลังผ่านการแช่เส้นด้ายไหมไป 1 ชั่วโมง (รูปที่ 4.10) พบว่าซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4 (รูปที่ 4.10 ก) และที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 5 (รูป 4.10 ข) เปลี่ยนเป็นของเหลวใสไม่มีสี และมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำมาก ในขณะที่สีและค่าการดูดกลืนของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 8 (รูป 4.10 ค) ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสีของเส้นด้ายไหมที่ชุบด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์หลังผ่านไป 1 ชั่วโมงมาจากอนุภาคซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ไปเคลือบอยู่บนผิวของเส้นด้ายไหม โดยค่าความเป็นกรด - ต่างของซิลเวอร์คอลลอยด์ส่งผลต่อการย้อมติดสีของเส้นด้ายไหม



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น (เส้นทึบ)และหลังผ่านไป 1 ชั่วโมง (เส้นประ) ของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ (ก) ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4, (ข) ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 5 และ (ค) ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 8

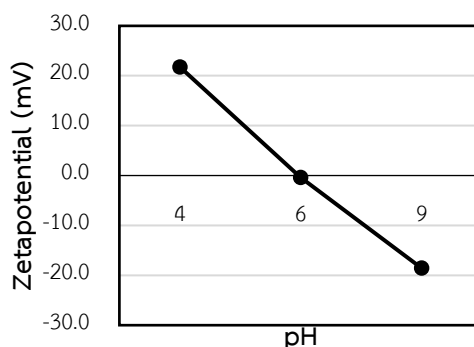
หลังจากนำเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินที่ค่าความเป็นกรด - ต่างต่างๆ ไปวัดความเข้มสี (K/S) ที่ความยาวคลื่น 600 และ 640 นาโนเมตร (รูปที่ 4.11) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน พบว่าเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 6 - 9 ที่มีค่าความเข้มสีที่ต่ำมาก (<0.1) เมื่อเทียบกับเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4 และ 5 ซึ่งพบว่ามีความเข้มสีที่สูง (~0.9) โดยที่ ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 5 จะให้ค่าความเข้มสีมากกว่าที่ pH 4 เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถเคลือบติดผิวเส้นด้ายไหมได้ดีที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4 และ 5



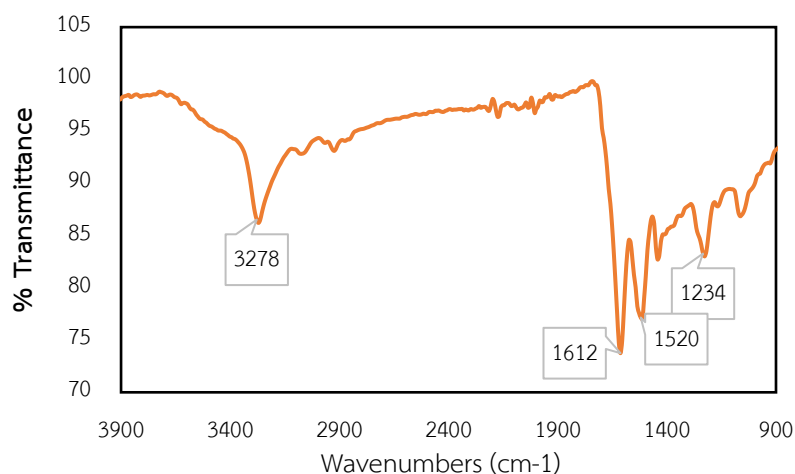
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเข้มสีของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างต่าง ๆ

ผลการศึกษาค่าศักย์เซต้าของเส้นด้ายไหม แสดงดังในรูปที่ 4.12 พบว่า เส้นด้ายไหมมีค่าศักย์เซต้าเท่ากับ 21.80 ± 0.90 , -0.35 ± 0.15 , และ -18.57 ± 0.64 มิลลิโวลต์ เมื่ออยู่ในสภาวะที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับเท่ากับ 4, 6 และ 9 ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าเส้นด้ายไหมมีประจุเป็นบวกที่สภาวะเป็นกรด และมีประจุเป็นลบที่สภาวะเป็นด่าง ซึ่งเนื่องมาจากความเป็นแอมโฟเทอริกของเส้นด้ายไหม เมื่อพิจารณาจากกราฟ FTIR ดังรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าเส้นด้ายไหมเป็นเส้นใยโปรตีนที่ประกอบไปด้วย N - H amino group, C=O (amide I), C=O (amide II), และ C=O (amide III)^[5] ที่ตำแหน่ง 3278 , 1612 , 1520, และ 1234 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งในสภาวะที่เป็นกรด หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระที่เป็นหมู่นิวคลีโอไฟล์ (Nucleophile) จะสามารถดูดซับ H^+ จากกรด ได้เป็น NH_3^+ ทำให้ที่ผิวของเส้นด้ายไหมมีประจุบวกมากขึ้น ในขณะที่ผิวของเส้นด้ายไหม

เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นต่าง จะเกิดการแตกตัวของหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (-COOH) ได้เป็นหมู่คาร์บอกซิเลต (-COO⁻) ส่งผลให้มีประจุลบเพิ่มมากขึ้น^[14, 56]

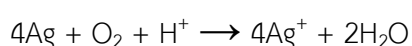


รูปที่ 4.12 ค่าศักย์เซต้าของเส้นด้ายไหมในสภาวะความเป็นกรด - ต่างที่แตกต่างกัน

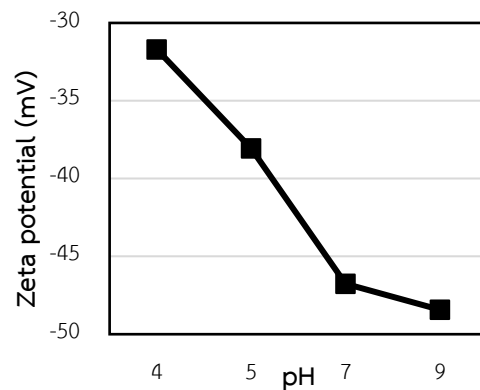


รูปที่ 4.13 กราฟ FTIR แสดงหมู่ฟังก์ชันของเส้นด้ายไหม

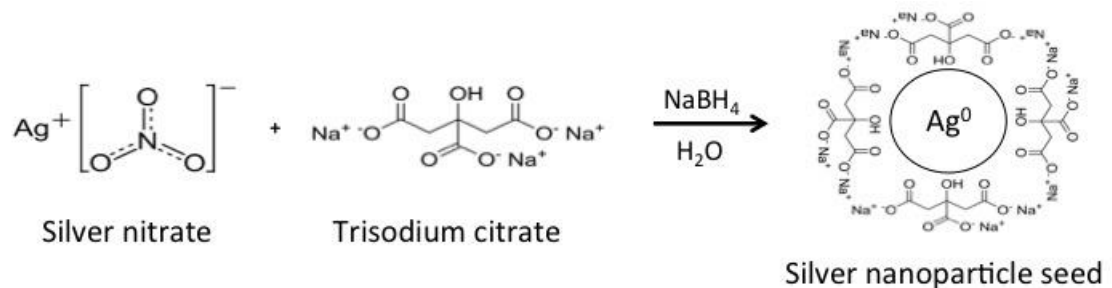
เมื่อพิจารณาค่าศักย์เซต้าของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในรูปที่ 4.14 พบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในคอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4, 5, 7 และ 9 มีค่าศักย์เซต้าเท่ากับ -31.7, -38.1, -46.8 และ -48.4 มิลลิโวลต์ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีประจุที่ผิว (surface charge) เป็นลบ ซึ่งเป็นผลมาจากการมีซิเตรตไอออนล้อมอยู่รอบๆอนุภาคหลังการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งค่าค่าศักย์เซต้าที่ได้ พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด - ต่างลดลง (ความเป็นกรดมากขึ้น) ค่าศักย์เซต้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรด โปรตอน (H⁺) จากกรดจะทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์เกิดการละลายแบบออกซิเดชัน (oxidative dissolution) ทำให้ได้เป็น Ag⁺ ตามสมการที่ 4.1 ซึ่งจะปลดค่าความเป็นประจุลบของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ทำให้ค่าศักย์เซต้าเป็นบวกมากขึ้น^[16, 57, 58]



สมการที่ 4.1



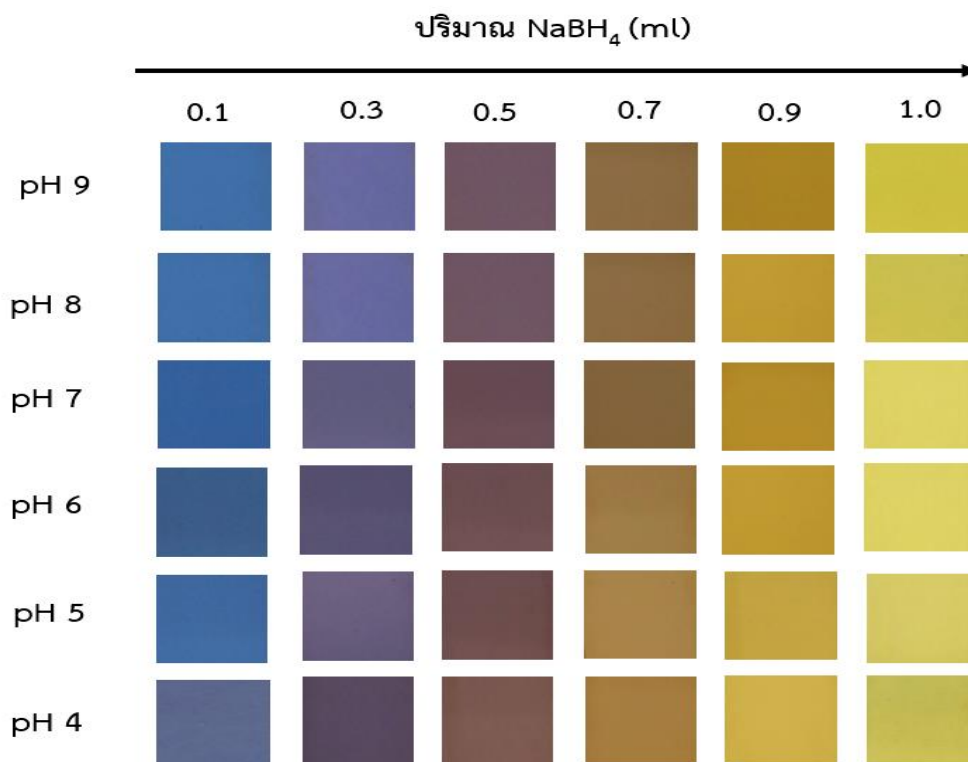
รูปที่ 4.14 ค่าศักย์เซต้าของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในคอลลอยด์ที่สภาวะความเป็นกรด - ต่างต่างกัน



รูปที่ 4.15 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์^[59]

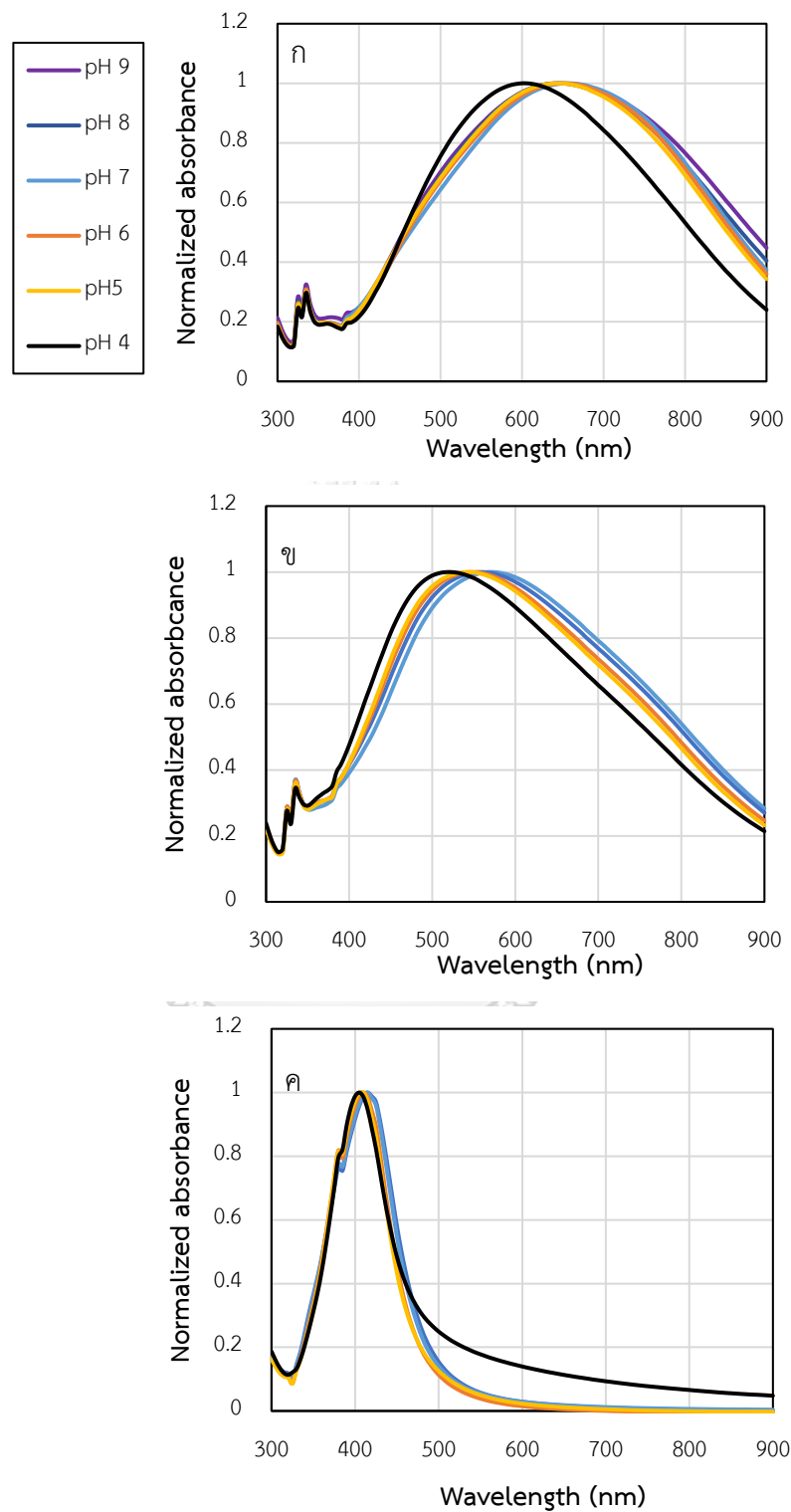
จากค่าศักย์เซต้าของเส้นด้ายไหมและอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ณ ค่าความเป็นกรด - ต่างต่าง ๆ สามารถใช้อธิบายการย้อมสีของเส้นด้ายไหมได้ เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกลาง - ต่าง (ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 6 - 9) ประจุที่ผิวของทั้งเส้นด้ายไหมและอนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นลบ ทำให้เกิดแรงผลักกันระหว่างประจุลบ - ลบ ส่วนในสภาวะที่เป็นกรด (ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4 - 5) ประจุที่ผิวของเส้นด้ายไหมเป็นบวก จึงสามารถเกิดแรงดึงดูดกับประจุลบที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถเคลือบบนผิวของเส้นด้ายได้จนเกิดการย้อมติดสีได้^[14, 59]

ซึ่งความเป็นกรด - ต่างของซิลเวอร์คอลลอยด์นอกจากจะส่งผลต่อการย้อมสีเส้นด้ายไหมและค่าศักย์เซต้าของเส้นด้ายไหมและอนุภาคนาโนซิลเวอร์แล้ว ยังส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของซิลเวอร์คอลลอยด์อีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4 สีของซิลเวอร์คอลลอยด์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดที่สุด โดยคอลลอยด์สีน้ำเงิน (0.1 - 0.3 มิลลิลิตร) เปลี่ยนโทนสีเป็นโทนสีม่วง คอลลอยด์สีม่วง (0.5 มิลลิลิตร) น้ำตาล (0.7 มิลลิลิตร) และส้ม (0.9 มิลลิลิตร) เปลี่ยนเป็นเฉดสีอ่อนลง ส่วนคอลลอยด์สีเหลือง (1.0 มิลลิลิตร) เปลี่ยนเป็นเฉดสีเข้มขึ้น



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด – ต่างแตกต่างกัน

การเปลี่ยนสีของซิลเวอร์คอลลอยด์สามารถอธิบายได้โดยอาศัยกราฟการดูดกลืนแสง ดังรูปที่ 4.17 พบว่าซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน (รูป 4.16 ก: 0.3 มิลลิลิตร) สีม่วง (รูป 4.16 ข: 0.5 มิลลิลิตร) และสีเหลือง (รูป 4.16 ค: 1.0 มิลลิลิตร) เมื่อปรับค่าความเป็นกรด – ต่างเท่ากับ 4 มีตำแหน่งพีคเปลี่ยนไป โดยการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง ซึ่งลักษณะการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง (blue shift) เป็นผลมาจากอนุภาคมีขนาดลดลง^[25, 60] นอกจากนี้ยังพบว่าพีคของตัวอย่างคอลลอยด์สีเหลือง (รูป 4.17 ค: 1.0 มิลลิลิตร) ที่ค่าความเป็นกรด – ต่างเท่ากับ 4 มีลักษณะกว้างขึ้น ซึ่งความกว้างของพีคที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการกระจายขนาดที่ไม่เป็นระเบียบของอนุภาคภายในซิลเวอร์คอลลอยด์^[25]



รูปที่ 4.17 กราฟการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน (ก: 0.3 มิลลิลิตร) สีม่วง (ข: 0.5 มิลลิลิตร) และสีเหลือง (ค: 1.0 มิลลิลิตร)

เมื่อซิลเวอร์คอลลอยด์อยู่ในสภาวะที่เป็นต่างค่าศักย์เซต้าเป็นลบมาก ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีความเสถียรมาก ในขณะที่ซิลเวอร์คอลลอยด์ที่อยู่ในสภาวะที่เป็นกรดจะเกิดการละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจากโปรตอน ทำให้ความเสถียรลดลง ซึ่งการเกิดการละลายของอนุภาคทำให้อนุภาคบางส่วนมีขนาดเล็กลง อีกทั้งยังส่งผลให้อนุภาคบางส่วนเกิดการรวมตัวกัน (aggregation) จนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคในคอลลอยด์ส่งผลให้สีของคอลลอยด์เปลี่ยนไป โดยสังเกตได้จากตำแหน่งและความกว้างของพีคที่เปลี่ยนไป^[16, 57, 58]

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าค่าความเป็นกรด - ต่างที่เหมาะสมต่อการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ดีที่สุด คือ ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 5 เนื่องจากสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ใช้ย้อมไม่แตกต่างจากสีที่ได้จากการสังเคราะห์ อีกทั้งการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 5 ยังให้ค่าความเข้มสีที่สูงที่สุดด้วย

4.2.2 ศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการย้อมเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์

ระยะเวลาที่ใช้ในการย้อมเส้นด้ายไหมมีความสำคัญต่อความเข้มสีและการนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการย้อมเส้นด้ายไหมในหัวข้อนี้กำหนดสภาวะย้อม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

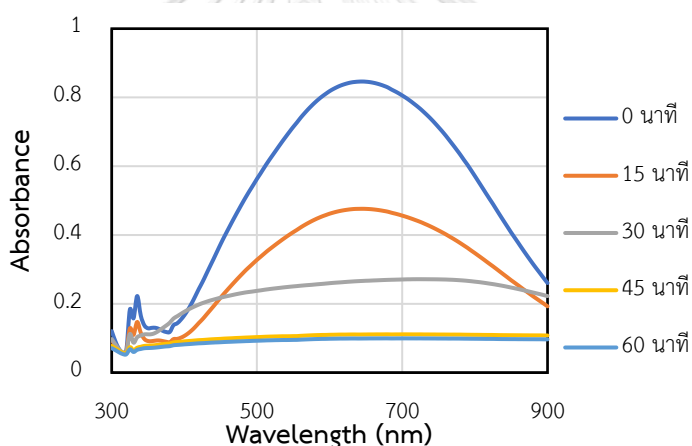
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดสภาวะที่ใช้ในการย้อมเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์

สภาวะ	สภาวะที่ใช้
สี	คอลลอยด์สีน้ำเงิน
ค่าความเป็นกรด - ต่าง	pH = 5
อัตราส่วนสีย้อม: น้ำหนักเส้นด้าย	200:1
วิธี	จุ่มแช่ในเครื่องสั่นอัลตราโซนิก
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ระยะเวลาที่ใช้	15, 30, 45, และ 60 นาที

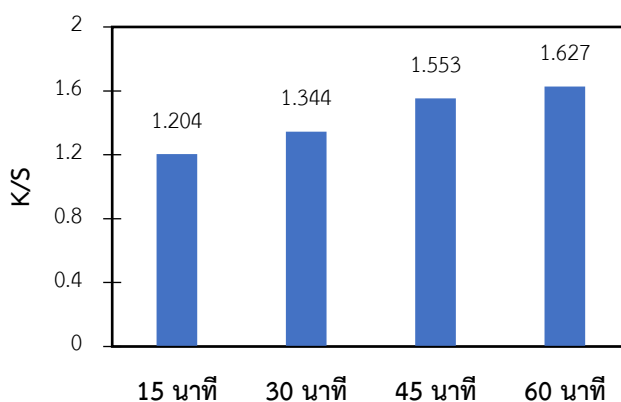
ผลค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ใช้ในการย้อมเส้นด้ายไหมก่อนและหลังการย้อมตามเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป สีของซิลเวอร์คอลลอยด์มีสีจางลง เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีสีไปเคลือบบนผิวของเส้นด้ายไหม ทำให้จำนวนอนุภาคในคอลลอยด์ลดลง ค่าการดูดกลืนแสงจึงลดลงเช่น ซึ่งเมื่อระยะเวลาการย้อมผ่านไป 15 นาที ค่าการดูดกลืนแสงลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้น แสดงว่าอนุภาคซิลเวอร์คอลลอยด์ประมาณครึ่งหนึ่งของอนุภาคทั้งหมดสามารถเคลือบบนผิวของเส้นด้ายไหมภายในระยะเวลา 15 นาที โดยเมื่อ

ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์ก็ยิ่งลดลง จนกระทั่งที่ 45 นาทีเป็นต้นไป พบว่าค่าการดูดกลืนแสงลดลงจนมีค่าประมาณ 0.1 ซึ่งต่ำมาก สีของซิลเวอร์คอลลอยด์หลังย้อมเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสี แสดงว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในคอลลอยด์เกือบทั้งหมดไปเคลือบอยู่บนผิวของเส้นด้ายไหมแล้ว

จากนั้นเมื่อทดสอบวัดค่าความเข้มสีของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินที่ 640 นาโนเมตร (รูปที่ 4.19) พบว่า ความเข้มสี (K/S) สีน้ำเงินของเส้นด้ายไหมมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการย้อมที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความเข้มสีเท่ากับ 1.204, 1.344, 1.553 และ 1.627 เมื่อเวลาที่ใช้ย้อมเท่า 15, 30, 45, และ 60 นาที ซึ่งจากค่าที่ได้พบว่าสามารถย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ได้ภายในระยะเวลา 15 นาที ณ อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้ค่าความเข้มสีของตัวอย่างที่ย้อมระยะเวลา 45 และ 60 นาที มีค่าที่สูงที่สุดและค่าแตกต่างกันไม่มาก จึงสามารถใช้เวลา 45 นาทีเป็นเวลาสูงสุดในการย้อมเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์



รูปที่ 4.18 ค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินหลังการย้อมเส้นด้ายไหมที่เวลาต่างๆ



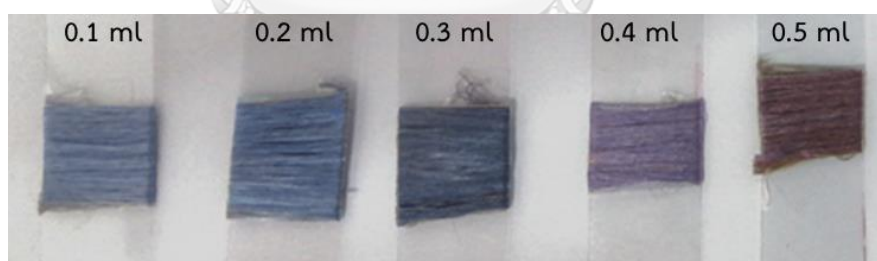
รูปที่ 4.19 ค่าความเข้มสีของเส้นด้ายไหมที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร หลังผ่านการย้อมที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

4.3 ผลการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีส้น

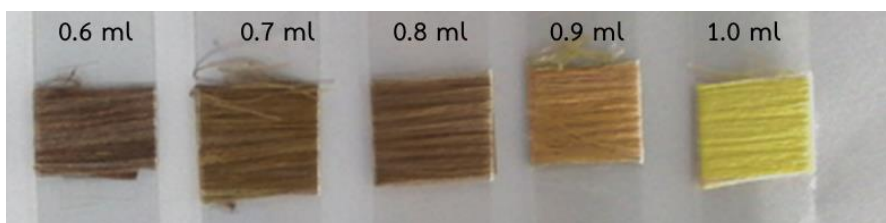
4.3.1 สีและสมบัติทางแสงของเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีส้น

รูปที่ 4.20 แสดงภาพของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีหลากสีส้นที่ใช้ปริมาณ NaBH_4 แตกต่างกันตั้งแต่ 0.1 – 1.0 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นซิลเวอร์คอลลอยด์ที่สังเคราะห์ได้ในหัวข้อ 4.1 โดยทำการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5 เป็นเวลา 45 นาที พบว่าสีของเส้นด้ายไหมที่ได้จากการย้อมจะมีสีค่อนข้างใกล้เคียงกับสีของซิลเวอร์คอลลอยด์

ค่าความเข้มสีซึ่งแทนค่าการดูดกลืนแสงของเส้นด้ายไหม ณ ความยาวคลื่นต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งตำแหน่งที่มีค่าความเข้มสีสูงสุดจะแทนตำแหน่งที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด โดยสีของเส้นด้ายไหมจะเป็นสีคู่ตรงข้ามของแสงสีที่ถูกดูดกลืน พบว่าเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน (0.1 – 0.3 มิลลิลิตร) มีค่าความเข้มสีสูงสุดที่ความคลื่นช่วง 560 – 700 นาโนเมตร, ย้อมด้วยคอลลอยด์สีม่วง (0.4 มิลลิลิตร) มีค่าความเข้มสีสูงสุดที่ความคลื่นที่ 530 นาโนเมตร, ย้อมด้วยคอลลอยด์สีม่วงแดง – แดง (0.5 – 0.6 มิลลิลิตร) มีค่าความเข้มสีสูงสุดที่ความคลื่นช่วง 460 - 490 นาโนเมตร, ย้อมด้วยสีน้ำตาล (0.7 – 0.8 มิลลิลิตร) มีค่าความเข้มสีสูงสุดที่ความคลื่นที่ 430 นาโนเมตร, และเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยสีส้ม (0.9 มิลลิลิตร) และสีเหลือง (1.0 มิลลิลิตร) มีค่าความเข้มสีสูงสุดที่ความคลื่น 420 นาโนเมตร ซึ่งตำแหน่งความยาวคลื่นที่ให้ค่าความเข้มสีสูงสุดจะแตกต่างจากผลของค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ใช้ย้อมสีเส้นด้ายไหมเล็กน้อย

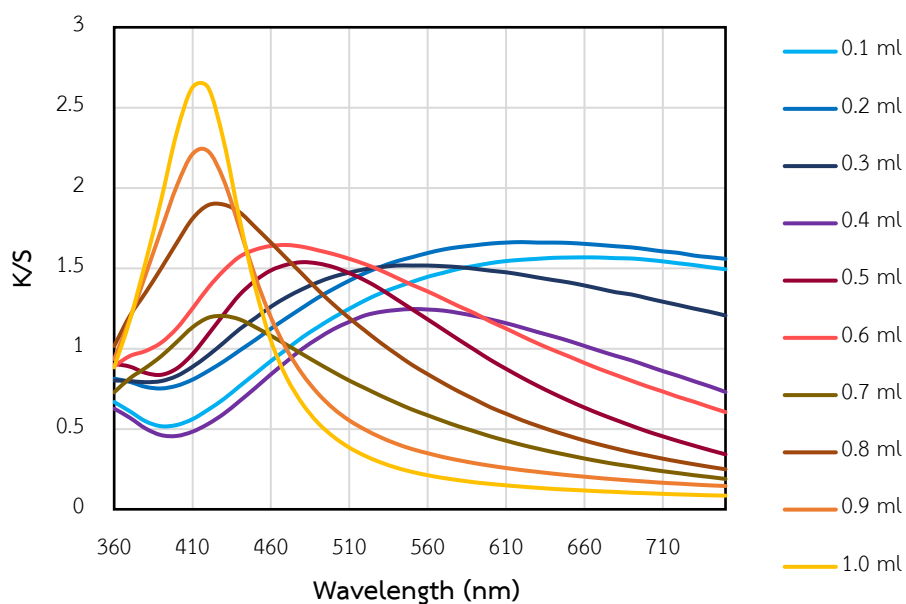


ก



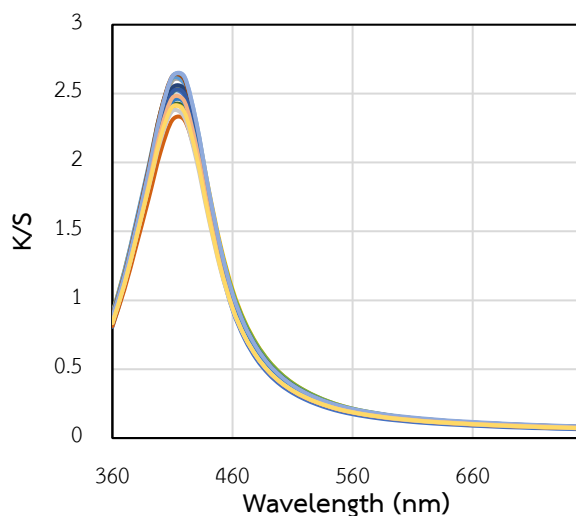
ข

รูปที่ 4.20 เส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ใช้ปริมาณ NaBH_4 ในการสังเคราะห์ตั้งแต่ (ก) 0.1 – 0.5 มิลลิลิตร และ (ข) 0.6 – 1.0 มิลลิลิตร



รูปที่ 4.21 กราฟค่าความเข้มสีต่อความยาวคลื่นของเส้นด้ายไหมที่ย้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีต่าง ๆ ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ปริมาณ NaBH_4 0.1 – 1.0 มิลลิลิตร

การทดสอบความสม่ำเสมอของสี (Color leveling) ของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์จะทดสอบโดยดูจากกราฟค่าความเข้มสีต่อความยาวคลื่น พบว่าเมื่อวัดค่าความเข้มสีของเส้นด้ายไหมสีเหลืองที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลืองแบบสุ่มจำนวน 20 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ความเข้มสีต่อความยาวคลื่นของทั้ง 20 จุดมีค่าใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์จะมีความสม่ำเสมอของสีอยู่ในเกณฑ์ดี

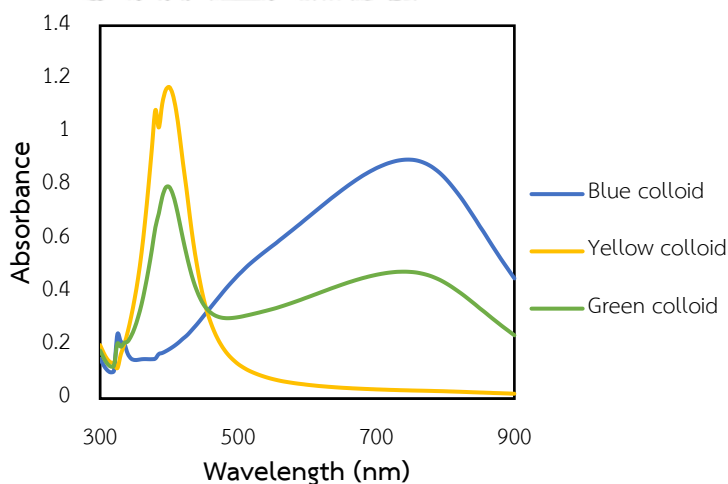


รูปที่ 4.22 กราฟค่าความเข้มสีของเส้นด้ายสีเหลืองเมื่อทำการวัดแบบสุ่มจำนวน 20 จุด

นอกจากนี้ยังพบว่าซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีสีแตกต่างกันสามารถนำมาผสมกันเพื่อสร้างซิลเวอร์คอลลอยด์สีใหม่ได้ เมื่อผสมระหว่างซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลืองและซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินจะได้ซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียว (รูปที่ 4.23 ก) ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวจะแสดงพีค 2 ตำแหน่ง คือ ที่ความยาวคลื่น 400 และ 740 นาโนเมตร เนื่องจากในคอลลอยด์สีเขียวมีอนุภาคที่มีสมบัติการดูดกลืนแสงที่ต่างกัน โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์สีเหลืองและสีน้ำเงินมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 400 และ 740 นาโนเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.23 ข)



ก



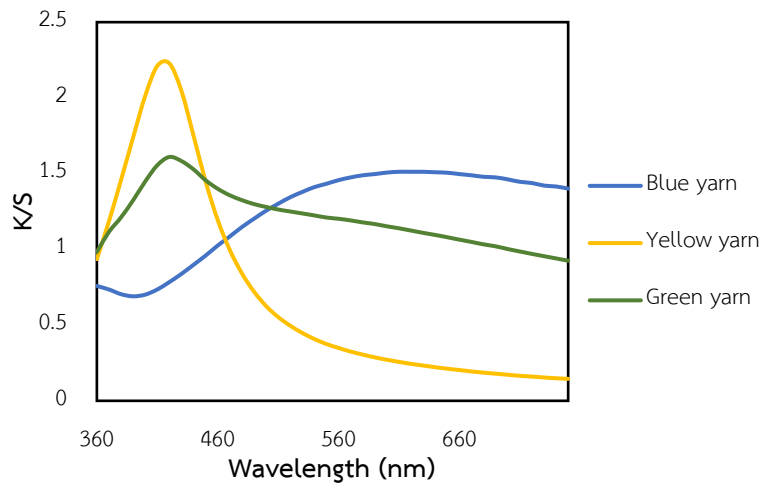
ข

รูปที่ 4.23 (ก) ภาพซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวที่ได้จากการผสมระหว่างซิลเวอร์สีน้ำเงินและสีเหลือง และ (ข) ค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน สีเหลือง และสีเขียว

เมื่อนำซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวที่ได้จากการผสมระหว่างซิลเวอร์สีน้ำเงินและสีเหลืองมาขย้อมเส้นด้ายไหมจะได้เป็นเส้นด้ายไหมสีเขียว (รูปที่ 4.24 ก) โดยที่กราฟค่าความเข้มสีของเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยคอลลอยด์สีเขียวจะปรากฏพีคแบบรวมกันเป็นช่วงกว้าง ซึ่งแตกต่างจากเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินและสีเหลืองที่ได้จากการสังเคราะห์ที่กราฟค่าความเข้มสีจะปรากฏพีคเดี่ยว โดยช่วงความกว้างของพีคที่ได้จะแสดงช่วงความเข้มสีของสีน้ำเงินและสีเหลือง (รูปที่ 4.24 ข)



ก

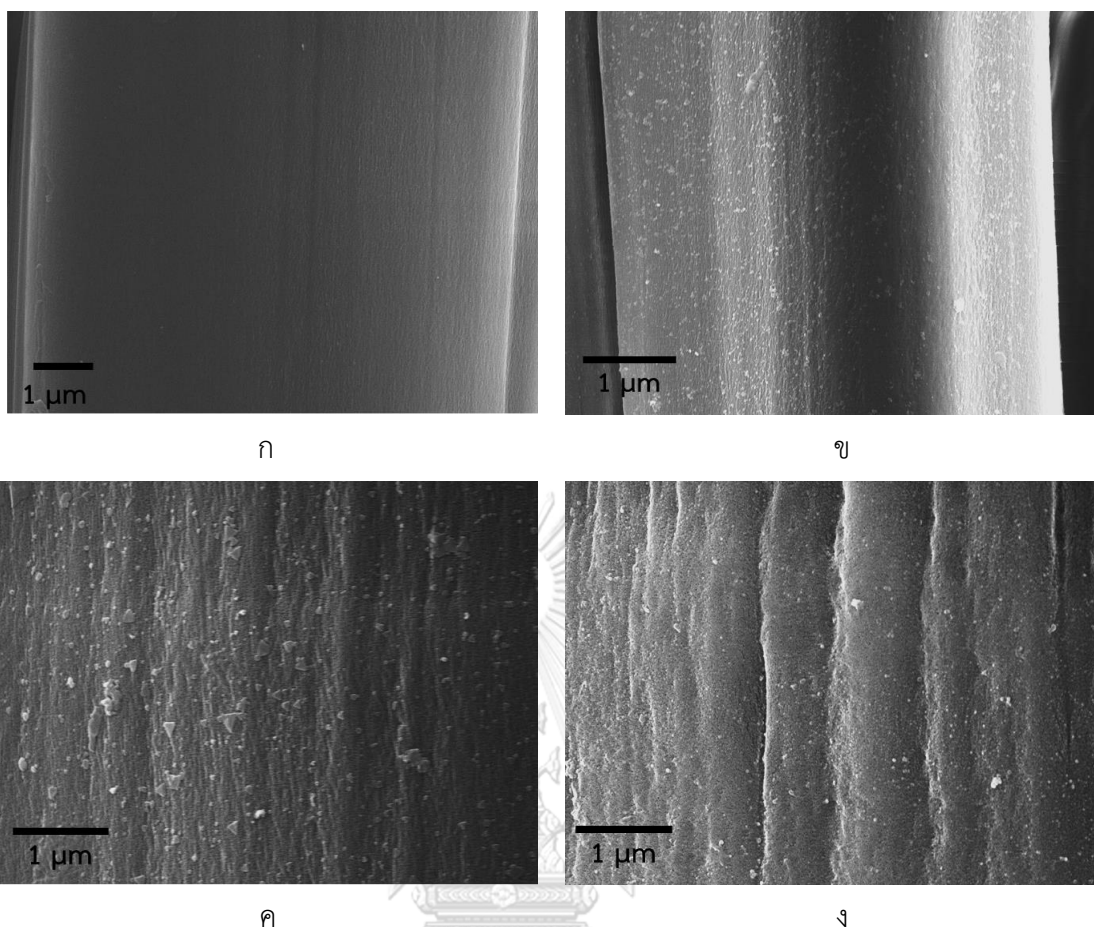


ข

รูปที่ 4.24 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) กราฟค่าความเข้มสีต่อความยาวคลื่นของเส้นด้ายไหมสีเขียวที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวที่ได้จากการผสมสีเปรียบเทียบกับเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินและสีเหลืองที่ได้จากการสังเคราะห์

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสี

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM ของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ (สีขาว) (รูปที่ 4.25 ก) พบว่าผิวของเส้นด้ายไหมมีลักษณะเรียบ ไม่มีอนุภาคใดๆ เกาะ ซึ่งแตกต่างจากผิวของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมสี (รูปที่ 4.25 ข) ที่จะปรากฏอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเพื่อศึกษาเส้นด้ายไหมสีน้ำเงิน (รูปที่ 4.25 ค) และสีเหลือง (รูปที่ 4.25 ง) พบว่าผิวของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินจะปรากฏอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีรูปร่างทรงปริซึมกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว ส่วนผิวของเส้นด้ายไหมสีเหลืองจะปรากฏอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงกลมขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษารูปร่างอนุภาคของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในคอลลอยด์สีต่าง ๆ ในหัวข้อ 4.1 กล่าวได้ว่าสีของเส้นไหมเป็นสีที่มาจากสีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีลักษณะรูปร่างแตกต่างกัน



รูปที่ 4.25 ลักษณะผิวของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อมสี (ก) และ (ข) ผ่านการย้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า และลักษณะผิวของเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์สีน้ำเงิน (ค) และสีเหลือง (ง) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

4.3.3 สมบัติการต้านแบคทีเรียของเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสี

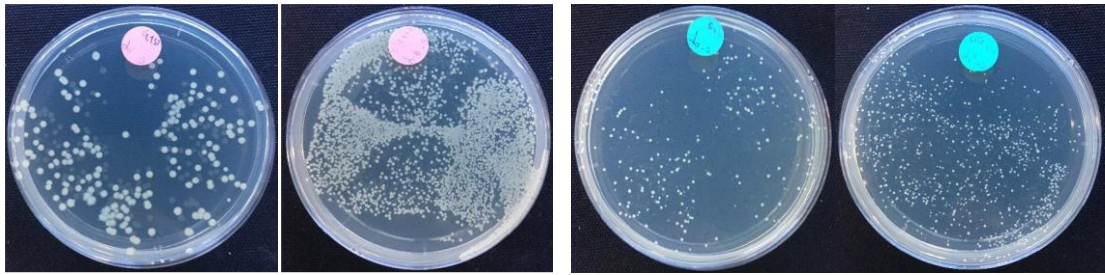
โดยทั่วไปเส้นด้ายไหมไม่มีความสามารถในการต้านแบคทีเรีย ดังแสดงในรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าหลังผ่านไป 24 ชั่วโมง จานเพาะเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli*. และ *S. aureus*. ที่ทดสอบกับเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อมสีจะปรากฏโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียจำนวนมาก ซึ่งการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ พบว่าสามารถเพิ่มสมบัติต้านแบคทีเรียได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 – 4.28

เมื่อทดสอบความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli*. ของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ พบว่าหลังผ่านไป 24 ชั่วโมง จานเพาะเชื้อที่ทดสอบด้วยเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินและสีเหลืองไม่ปรากฏโคโลนีของแบคทีเรียชนิด *E. coli*. (รูปที่ 4.27 ก – ข) และเมื่อทดสอบความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. พบว่าในจานเพาะเชื้อที่ทดสอบด้วยเส้นด้าย

ไหมสีน้ำเงินและสีเหลืองหลังผ่านไป 24 ชั่วโมง จะพบโคโลนีของแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. (รูปที่ 4.28 ก – ข) และเมื่อคำนวณร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *E. coli* ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินและสีเหลืองจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 100 กล่าวคือสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ดีเยี่ยม (รูปที่ 4.29) ส่วนร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *S. aureus* ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.99 และเส้นด้ายไหมสีเหลืองจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.98 (รูปที่ 4.29) ซึ่งร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *S. aureus* ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินมีค่ามากกว่าของเส้นด้ายไหมสีเหลือง เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์สีน้ำเงินมีรูปร่างเป็นทรงนาโนปริซึมมีพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาค (specific surface area) มากกว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์สีเหลืองที่มีรูปทรงกลม ทำให้สามารถเกิดการออกซิไดซ์จากออกซิเจนแล้วแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออนที่แทรกเข้าไปในผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้เร็วกว่า^[61] อนุภาคนาโนซิลเวอร์สีน้ำเงินจึงสามารถแสดงสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียได้ดีกว่าเมื่ออยู่บนผิวของเส้นด้ายไหม

เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย จะเห็นได้ว่าเส้นด้ายสีน้ำเงินและสีเหลืองที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะมีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *S. aureus* น้อยกว่าความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli*. เนื่องจากแบคทีเรียชนิด *S. aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งมีผนังเซลล์ที่หนาและมีความแข็งแรงทนทานสูง เนื่องจากผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกจะประกอบไปด้วยเปปทิโดไกลแคน (peptidoglycan) ที่มีการเชื่อมกับกรดไทโคอิก (teichoic acids) จึงทำให้ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกมีความทนทานมากกว่าผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบหรือ *E. coli*. ดังนั้นการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *S. aureus* จึงยากกว่าการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli*.^[61, 62]

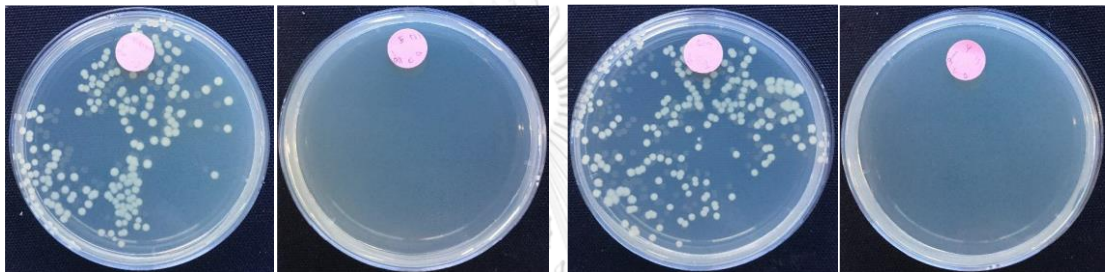
นอกจากนี้ยังพบว่าค่าร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ที่ทดสอบกับเส้นด้ายไหมสีเหลืองมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทดสอบซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลือง แสดงว่าเมื่ออนุภาคนาโนซิลเวอร์ถูกเคลือบลงบนผิวของเส้นด้ายไหมจะทำให้ความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่อยู่ในตัวกลางของเหลวจะสามารถเกิดการแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออนได้ง่ายกว่า จึงสามารถแสดงสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียได้ดีกว่า



ก

ข

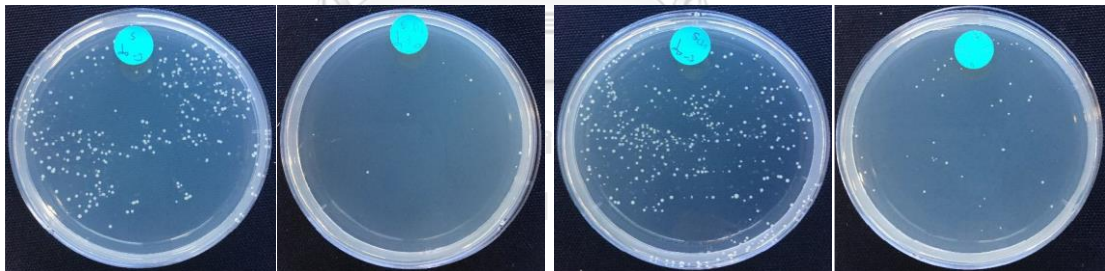
รูปที่ 4.26 จำนวนแบคทีเรีย *E. coli* (ก) และ *S. aureus*. (ข) ในเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อมสีที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)



ก

ข

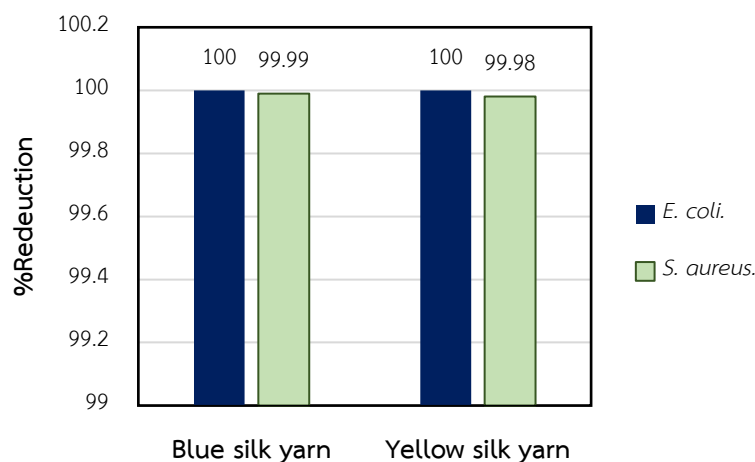
รูปที่ 4.27 จำนวนแบคทีเรีย *E. coli* ในเส้นด้ายไหมสีน้ำเงิน (ก) และเส้นด้ายไหมสีเหลือง (ข) ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)



ก

ข

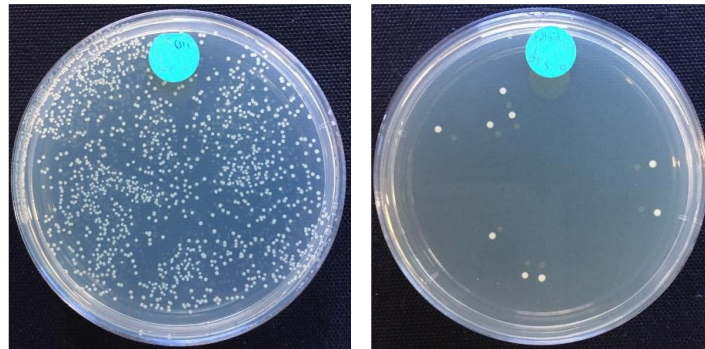
รูปที่ 4.28 จำนวนแบคทีเรีย *S. aureus*. ในเส้นด้ายไหมสีน้ำเงิน (ก) และเส้นด้ายไหมสีเหลือง (ข) ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)



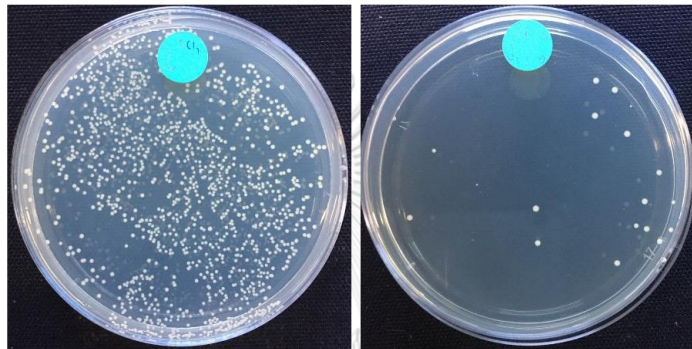
รูปที่ 4.29 ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *E. coli* และ *S. aureus*. ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินและสีเหลือง

เมื่อพิจารณาถึงสมบัติของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus*. พบว่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*. พบได้น้อยในสิ่งทอ ในขณะที่เชื้อแบคทีเรีย *S. aureus*. มักถูกพบได้มากบนสิ่งทอและเป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคผิวหนัง อีกทั้งยังเป็นเชื้อแบคทีเรียที่ถูกทำลายได้ยาก ดังนั้นการศึกษาสมบัติต้านแบคทีเรียของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการย้อมสีจะเน้นที่การทดสอบกับแบคทีเรียชนิด *S. aureus*.

ซึ่งจากการทดสอบสมบัติต้านแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ของซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวยุคที่ได้จากการผสมระหว่างซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินและเหลือง และการทดสอบสมบัติต้านแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ของเส้นด้ายไหมสีเขียวยุค พบว่าหลังผ่านไป 24 ชั่วโมง งานเพาะเชื้อที่ทดสอบด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวยุคและเส้นด้ายสีเขียวยุคปรากฏโคโลนีของแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. เล็กน้อย (รูปที่ 4.30) ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) พบว่าซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวยุคและเส้นด้ายไหมสีเขียวยุคมีค่าร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียเท่ากับร้อยละ 100 และร้อยละ 99.99 ตามลำดับ (รูปที่ 4.31) แสดงว่าซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวยุคและเส้นด้ายไหมสีเขียวยุคสามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ได้ดีเยี่ยม

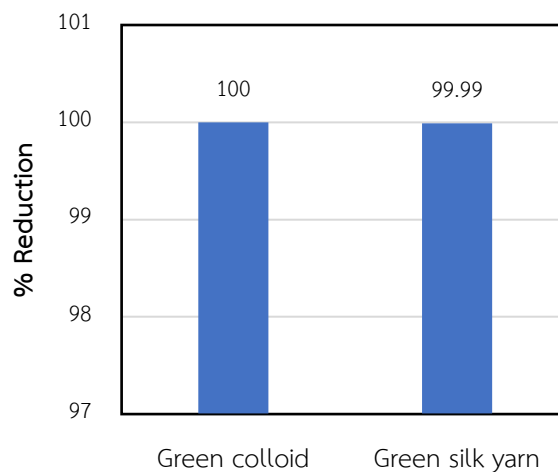


ก



ข

รูปที่ 4.30 จำนวนแบคทีเรีย *S. aureus*. ในซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียว (ก) และเส้นด้ายไหมสีเขียว (ข) ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)

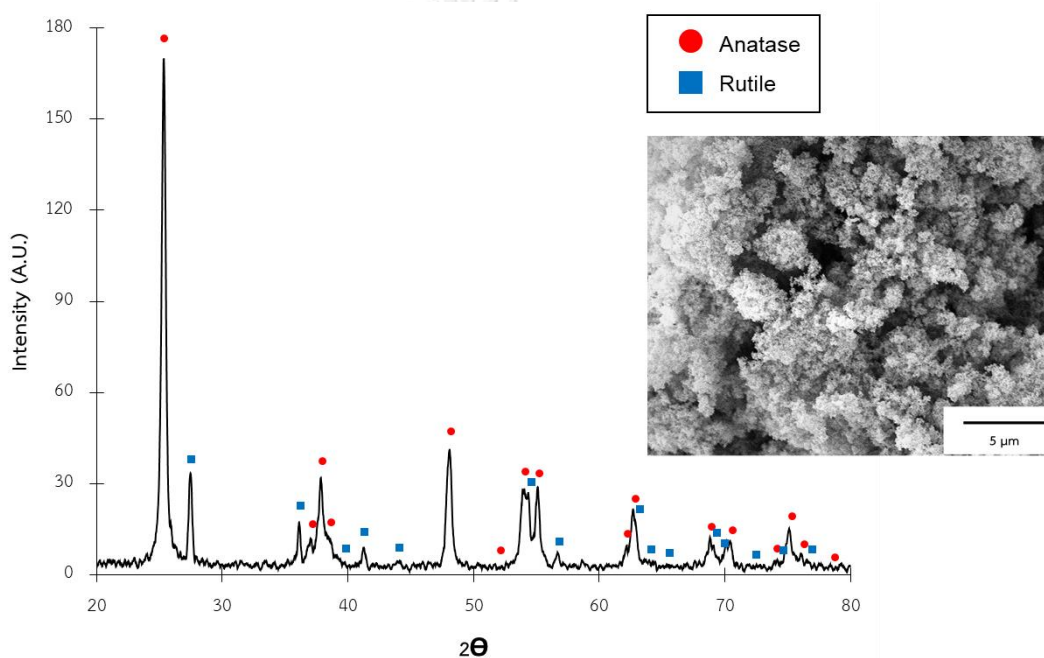


รูปที่ 4.31 ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *S. aureus*. ของซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวและเส้นด้ายไหมสีเขียว

4.4 ผลการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียต่อการข้อมสีและการเพิ่มสมบัติการป้องกันรังสียูวี

อนุภาคนาโนไททาเนียที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ไททาเนีย P25 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วย XRD พบว่าไททาเนีย P25 ประกอบด้วยอนาเทส (Anatase) เป็นเฟสหลัก และรูไทล์ (Rutile) เป็นเฟสรอง โดยอนุภาคของไททาเนียเป็นลักษณะทรงกลมที่มีขนาดเล็กมาก ประมาณ 50 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.32

ปริมาณไททาเนียที่ใช้ในการศึกษาในขั้นตอนนี้เท่ากับร้อยละ 1, 5, และ 10 โดยน้ำหนักเส้นด้ายไหม ซึ่งเมื่อคำนวณเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรคอลลอยด์ต่อน้ำหนักเส้นด้ายไหมต่อน้ำหนักไททาเนียจะแสดงดังตารางที่ 4.2

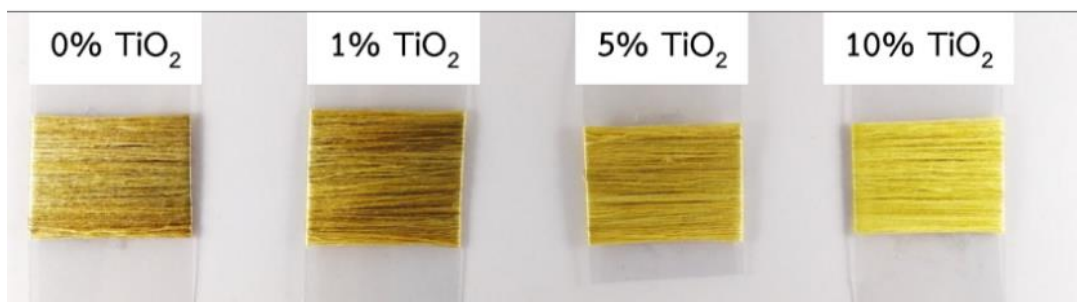


รูปที่ 4.32 องค์ประกอบเฟสและโครงสร้างจุลภาคของไททาเนีย P25

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดอัตราส่วนระหว่างปริมาตรคอลลอยด์ต่อน้ำหนักเส้นด้ายไหมต่อน้ำหนักไททาเนีย

ชื่อตัวอย่าง	ซิลเวอร์คอลลอยด์ (มิลลิลิตร)	เส้นด้ายไหม (กรัม)	ไททาเนีย (กรัม)
0%TiO ₂	200	1	-
1%TiO ₂	200	1	0.01
5%TiO ₂	200	1	0.05
10%TiO ₂	200	1	0.1

เมื่อนำซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลืองที่มีการเติมไททาเนียปริมาณต่าง ๆ ไปย้อมสีเส้นด้ายไหม พบว่า ปริมาณการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียส่งผลต่อสีของเส้นด้ายไหม ดังแสดงในรูป 4.33 ซึ่งค่าสี $L^*a^*b^*$ ตามระบบ CIELAB แสดงในตารางที่ 4.3



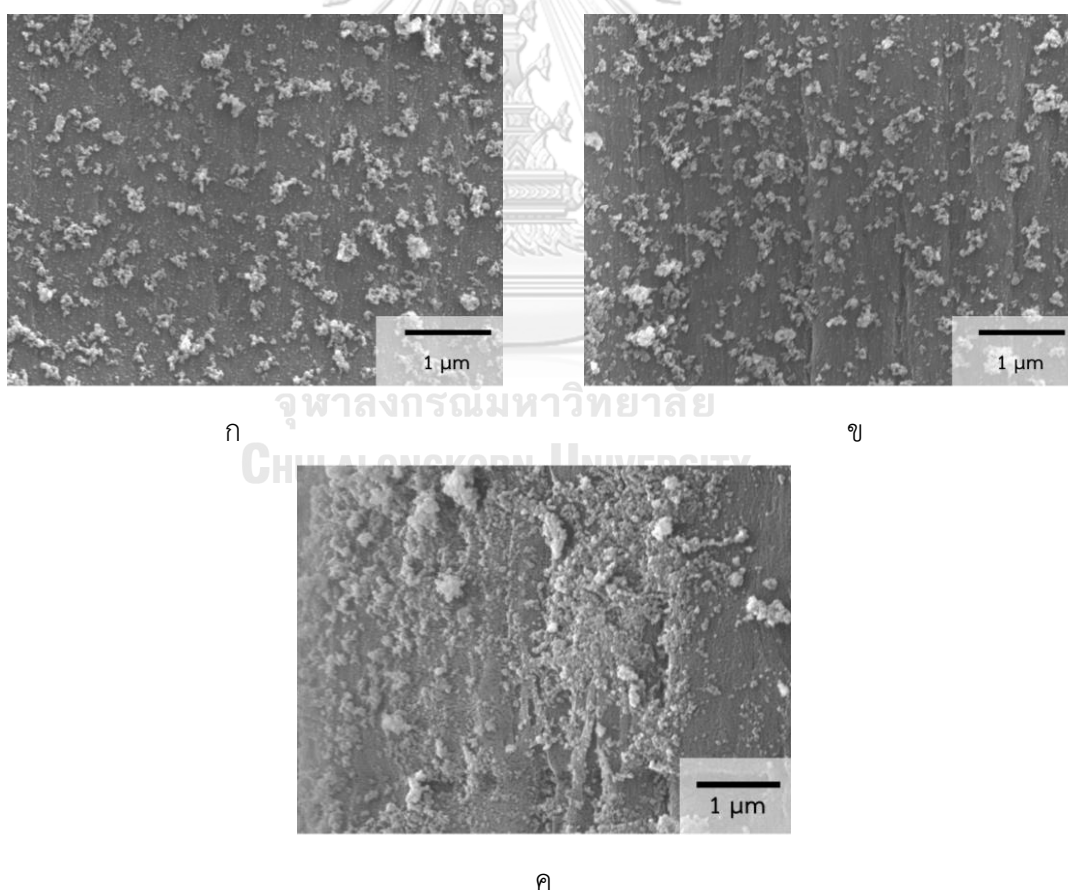
รูปที่ 4.33 ภาพเส้นด้ายไหมสีเหลืองที่มีปริมาณไททาเนียแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าสี $L^*a^*b^*$ ตามระบบ CIELAB ของเส้นด้ายไหมสีเหลืองที่มีปริมาณไททาเนียต่างกัน

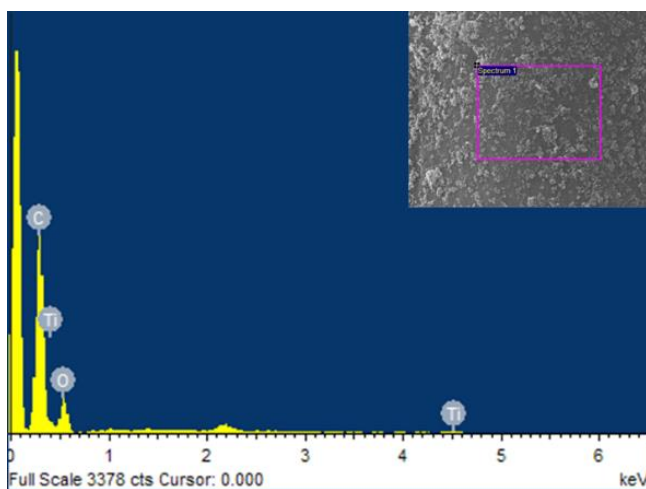
ชื่อตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*	ΔE
0%TiO ₂	70.50 ± 0.26	1.32 ± 0.10	28.24 ± 0.22	-
1%TiO ₂	74.05 ± 0.24	1.87 ± 0.15	33.76 ± 0.30	6.58 ± 0.10
5%TiO ₂	75.59 ± 0.40	0.32 ± 0.37	33.84 ± 0.23	8.63 ± 0.45
10%TiO ₂	77.98 ± 0.59	-0.44 ± 0.18	34.17 ± 0.36	9.71 ± 0.37

จากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไททาเนียที่เป็นผงสีขาวมากขึ้น ความขาวของผงไททาเนีย จะส่งผลให้ค่า L^* ที่บ่งบอกถึงค่าความสว่างของสีเพิ่มขึ้น ค่า a^* ลดลง (เป็นลบมากขึ้น) แสดงว่าความเป็นสีแดงลดลง ความเป็นสีเขียวมากขึ้น และค่า b^* เป็นบวกมากขึ้น แสดงว่าความเป็นสีเหลืองมากขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่า เมื่อเติมปริมาณไททาเนียมากขึ้นความเข้มของสีเหลืองจะมากขึ้นตามไปด้วย^[40] ซึ่งค่าความแตกต่าง (ΔE) ของสีเมื่อเทียบระหว่างเส้นด้ายไหมที่ไม่มีและที่มีปริมาณร้อยละ 1, 5 และ 10 เท่ากับ 6.58 ± 0.10 , 8.63 ± 0.45 และ 9.71 ± 0.37 กล่าวคือยิ่งเพิ่มปริมาณไททาเนียมากขึ้น ความแตกต่างของสีเส้นด้ายไหมที่มีและไม่มีไททาเนียยิ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งความแตกต่างของสีที่เปลี่ยนไปสามารถสังเกตได้ชัดเจน เนื่องจากค่า ΔE มีค่ามากกว่า 3.0

โดยรูปที่ 4.34 (ก - ค) แสดงภาพถ่าย FESEM พื้นผิวของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการซ้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีไททาเนียร์้อยละ 1, 5 และ 10 พบว่าพื้นผิวของเส้นด้ายไหมจะมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่เห็นชัดเจนเกาะกระจายตัวอยู่ และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีโดยการสแกนบนพื้นผิวเส้นด้ายไหมด้วยเทคนิค EDS พบว่าจุดที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กระจายอยู่ปรากฏพิกของธาตุ Ti (รูปที่ 4.35) แสดงว่าอนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวคือไททาเนีย ที่เกาะบนผิวของเส้นด้ายไหมได้ดี ซึ่งเมื่อปริมาณไททาเนียในซิลเวอร์คอลลอยด์เพิ่มขึ้น ปริมาณไททาเนียที่เกาะบนผิวของเส้นด้ายไหมก็เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเติมปริมาณไททาเนียร์้อยละ 1 (รูปที่ 4.34 ก) พบว่าไททาเนียกระจายอย่างสม่ำเสมอเป็นวงกว้าง และเมื่อเติมปริมาณไททาเนียร์้อยละ 5 (รูปที่ 4.34 ข) พบว่าไททาเนียจะกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของเส้นด้ายไหมค่อนข้างสม่ำเสมอ ในขณะที่เมื่อเติมปริมาณไททาเนียร์้อยละ 10 (รูปที่ 4.34 ค) ของน้ำหนักเส้นด้ายไหม จะพบว่าไททาเนียเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่ กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เกาะบนผิวของเส้นด้ายไหม



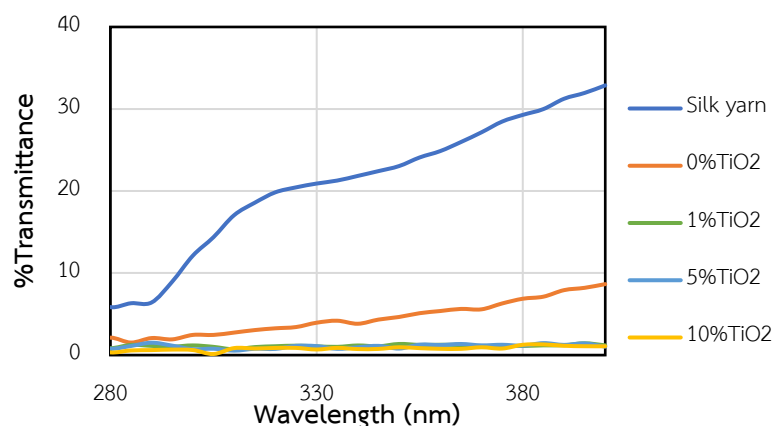
รูปที่ 4.34 ภาพ FESEM ของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการซ้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีไททาเนียร์้อยละ 1 (ก), 5 (ข) และ 10 (ค)



รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิค EDS ของเส้นเส้นด้ายไหมที่ผ่านการซ้อมสีด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีการเติมไททาเนีย

เมื่อนำเส้นด้ายไหมไปทดสอบค่าร้อยละการส่องผ่าน (%Transmittance) ของแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 280 – 400 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.36 พบว่าเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อมสีจะมีค่าร้อยละการส่องผ่านเท่ากับ 5 – 20 โดยเส้นด้ายไหมที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์เพียงอย่างเดียว (0% TiO₂) จะสามารถลดการส่องผ่านของแสงยูวีได้เล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีสมบัติ LSPR ซึ่งสามารถช่วยในการกระเจิงแสงของรังสียูวี จึงทำให้ค่าการส่องผ่านของแสงยูวีมีค่าลดลง^[63] ในขณะที่เส้นด้ายไหมที่มีการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียจะมีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงยูวีต่ำมาก โดยมีค่าประมาณร้อยละ 1 เนื่องจากไททาเนียที่กระจายอยู่บนผิวของเส้นด้ายไหมสามารถดูดกลืนรังสียูวีที่มากกระทบได้ อีกทั้งไททาเนียมีค่าดัชนีหักเหแสงสูง จึงสามารถเกิดกระเจิงแสงยูวีได้ดี ส่งผลให้ไททาเนียที่เคลือบบนผิวของเส้นด้ายไหมสามารถช่วยเพิ่มสมบัติการป้องกันรังสียูวีของเส้นด้ายไหมได้^[64]

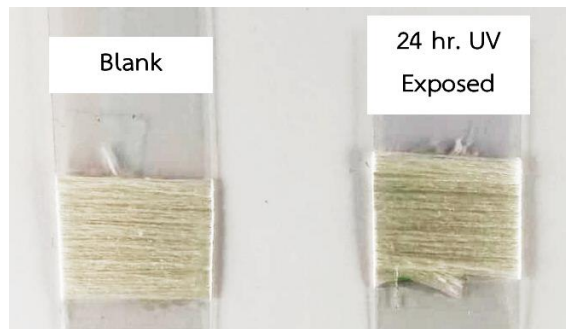
จากค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 280 – 400 นาโนเมตรของเส้นด้ายไหมที่มีการปรับผิว สามารถนำมาคำนวณค่า UPF ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการป้องกันแสงแดดของวัสดุสิ่งทอ โดยค่า UPF ของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อมสีมีค่าเท่ากับ 3.7 กล่าวคือมีความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้น้อย (UPF < 15) เส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ไม่เติมไททาเนียมีค่า UPF เท่ากับ 17.2 กล่าวคือ มีความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี (UPF = 15 - 24) ส่วนเส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่เติมไททาเนียร้อยละ 1, 5 และ 10 มีค่า UPF เท่ากับ 54.6, 60.7 และ 92.4 ตามลำดับ แสดงว่ามีความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้สูงสุด (UPF > 50)



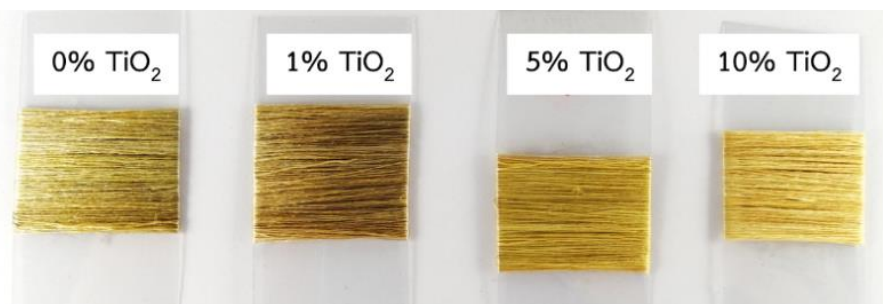
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงร้อยละการส่องผ่านของแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 280 – 400 นาโนเมตร ของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการย้อม ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ (0% TiO₂) และซิลเวอร์คอลลอยด์ผสมไททาเนีย (1%, 5%, และ 10% TiO₂)

เนื่องจากไททาเนียเป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysis) ได้ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี โดยเรดิกัลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นเส้นด้ายไหมซึ่งเป็นสารอินทรีย์จึงอาจถูกทำลายจากปฏิกิริยาดังกล่าวเมื่อไททาเนียได้รับการกระตุ้นด้วยแสง และอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของเส้นด้ายไหม จึงได้ทำการทดสอบความคงทนของเส้นไหมและสีของเส้นไหมต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนีย

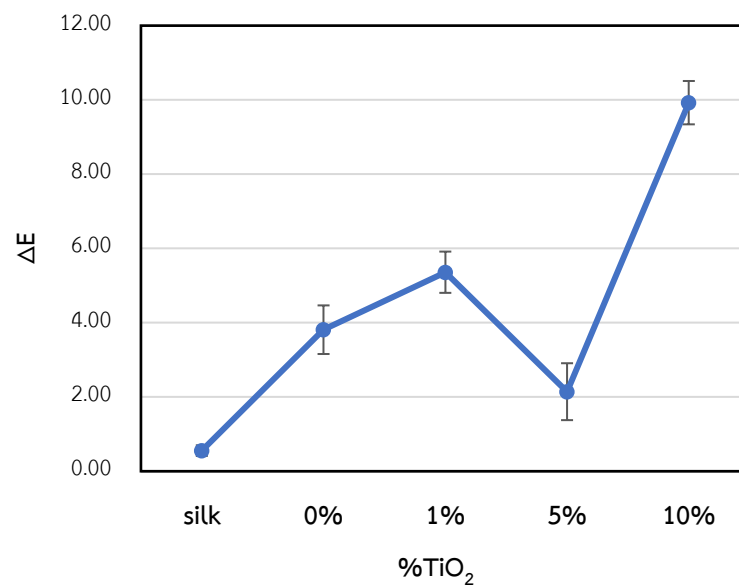
โดยผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนียแสดงเป็นค่าความแตกต่างของสี (ΔE) โดยการเปรียบเทียบสีของเส้นด้ายไหมก่อนและหลังฉายด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.37 (ก - ค) พบว่าเส้นด้ายไหมที่ไม่ได้ผ่านการย้อม (silk yarn) มีสีขาหลังจากผ่านการฉายแสงจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเล็กน้อย โดย เมื่อคำนวณค่า ΔE จะได้เท่ากับ 0.55 ± 0.14 ซึ่งถือว่ามีค่าต่ำมาก ส่วนสีของเส้นด้ายไหมที่ย้อมสีเหลืองที่ไม่มีการเติมไททาเนีย (0% TiO₂) เปลี่ยนไปเป็นโทนน้ำตาล โดยมีค่า ΔE เท่ากับ 3.81 ± 0.65 และที่มีการเติมไททาเนียร้อยละ 1 (1% TiO₂) และร้อยละ 10 (10% TiO₂) พบว่ามีค่า ΔE เท่ากับ 5.36 ± 0.56 และ 9.93 ± 0.58 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า ΔE ของตัวอย่าง 0% TiO₂ โดยค่าที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการที่เส้นด้ายไหมถูกทำลาย ทั้งจากแสงยูวีและจากการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนีย ทำให้สีของเส้นด้ายไหมมีสีเปลี่ยนไปจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เส้นด้ายไหมที่มีไททาเนียร้อยละ 5 (5% TiO₂) กลับพบว่าสีจางลงเล็กน้อย โดยมีค่า ΔE เท่ากับ 2.14 ± 0.77 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า ΔE ของตัวอย่าง 0% 1% และ 10% TiO₂ ซึ่งการเติมไททาเนียในปริมาณดังกล่าวสามารถป้องกันรังสียูวีให้กับเส้นด้ายไหม



ก



ข



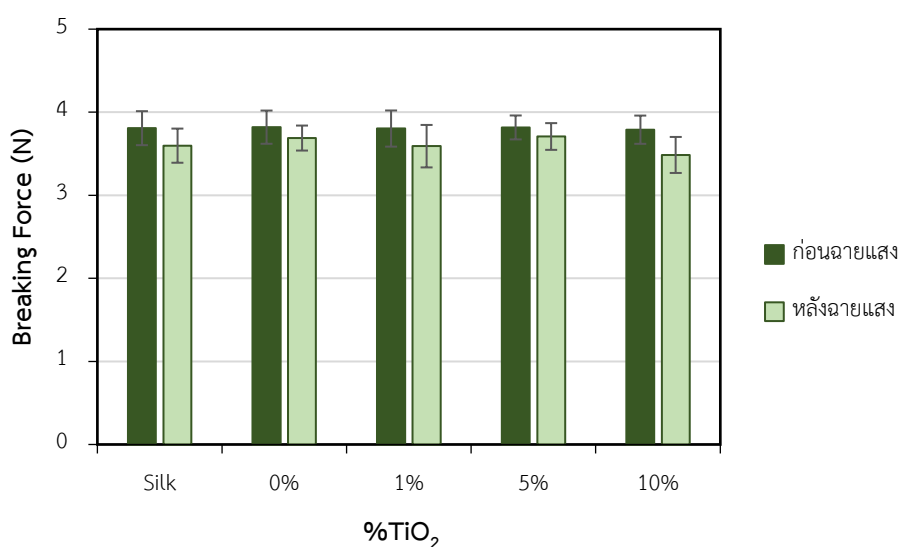
ค

รูปที่ 4.37 (ก) ภาพถ่ายเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบก่อนและหลังฉายแสงยูวี 24 ชั่วโมง
 (ข) ภาพถ่ายเส้นด้ายไหมที่มีปริมาณไททาเนียต่างๆ หลังฉายแสงยูวี 24 ชั่วโมง
 (ค) ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) หลังฉายแสงยูวี 24 ชั่วโมงของเส้นด้ายไหม

เมื่อศึกษาความแข็งแรงของเส้นด้ายไหมก่อนฉายแสงยูวี โดยตรวจสอบจากค่าแรงดึงที่จุดขาด (breaking force) ดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่าความแข็งแรงของเส้นด้ายไหมมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าแรงดึงที่จุดขาดของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบหรือย้อมมีค่าเท่ากับ 3.808 ± 0.20 นิวตัน ส่วนเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีการเติมไททาเนียร้อยละ 0, 1, 5, และ 10 มีค่าเท่ากับ 3.820 ± 0.20 นิวตัน, 3.803 ± 0.22 นิวตัน, 3.817 ± 0.14 นิวตัน และ 3.789 ± 0.17 นิวตัน ตามลำดับ จากค่าที่ได้แสดงว่าการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นด้ายไหม

แต่เมื่อฉายแสงยูวีลงบนตัวอย่างเส้นด้ายไหมทั้งหมดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าค่าความแข็งแรงของเส้นด้ายไหมลดลง โดยค่าแรงดึงที่จุดขาดของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าเท่ากับ 3.597 ± 0.21 นิวตัน เนื่องจากไหมมีสมบัติที่ไม่ทนต่อรังสียูวีเมื่อถูกฉายแสงเป็นระยะเวลานาน ความร้อนและรังสีของแสงยูวีจะไปสลายโครงสร้างโปรตีนในไหมทำให้ไหมเกิดการเสื่อมสภาพ จนเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองหรือน้ำตาลและมีค่าความแข็งแรงลดลง^[5] ส่วนเส้นด้ายไหมที่มีการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (0% TiO₂) มีค่าแรงดึงที่จุดขาดเท่ากับ 3.689 ± 0.15 นิวตัน เป็นผลมาจากความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ลดการถูกทำลายของเส้นด้ายไหมจากแสงยูวี ทำให้มีค่าความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเคลือบเล็กน้อย ส่วนเส้นด้ายไหมที่มีไททาเนียร้อยละ 1 (1% TiO₂) พบว่าค่าแรงดึงที่จุดขาดใกล้เคียงกับตัวอย่างเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบและผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ คือ 3.591 ± 0.26 นิวตัน และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียร้อยละ 5 (5% TiO₂) มีค่าแรงดึงที่จุดขาดเท่ากับ 3.708 ± 0.16 ซึ่งลดลงเพียงเล็กน้อยจากผลก่อนการฉายแสงยูวี อีกทั้งยังมีค่าความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจากไททาเนียปริมาณร้อยละ 5 เป็นปริมาณที่เหมาะสมแก่การเคลือบเส้นด้ายไหม ทำให้บนผิวของเส้นด้ายไหมมีการกระจายตัวของไททาเนียอย่างสม่ำเสมอ จึงช่วยป้องกันแสงยูวีและลดการทำลายเส้นด้ายไหมจากแสงยูวีได้ อีกทั้งอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่กระจายอยู่บนผิวยังช่วยลดการสัมผัสของไททาเนียกับเส้นด้ายไหม ทำให้เส้นด้ายไหมไม่ถูกทำลายจากปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนียอีกด้วย ในขณะที่เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียร้อยละ 10 (10% TiO₂) มีค่าความแข็งแรงต่ำสุด คือมีค่าแรงดึงที่จุดขาดเท่ากับ 3.485 ± 0.22 นิวตัน เนื่องจากปริมาณไททาเนียที่มากและเกาะกลุ่มกันบนผิวของเส้นด้ายไหม เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี ทำให้เกิดการทำลายเส้นด้ายไหมด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงอย่างมาก

เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลของค่าความแตกต่างของสี พบว่าสีที่เปลี่ยนไปของเส้นด้ายไหมที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียเป็นผลมาจากการถูกทำลายของเส้นด้ายไหมจากทั้งแสงยูวีและจากปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนีย อาจทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ยึดเกาะอยู่บนผิวเกิดการหลุดออก ส่งผลให้สีของเส้นด้ายไหมเปลี่ยนแปลงไป โดยเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยปริมาณไททาเนียน้อยกว่าร้อยละ 5 จะถูกทำลายจากแสงยูวีเป็นหลัก ในขณะที่เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยปริมาณไททาเนียมากกว่าร้อยละ 5 จะถูกทำลายจากปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนียได้





รูปที่ 4.38 ค่าแรงดึงที่จุดขาด (breaking force) ของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Silk), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีการเติมไททาเนียปริมาณต่างๆ (ร้อยละ 0 - 10)

จากผลการศึกษาเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียก่อนหน้าพบว่าเส้นด้ายไหมถูกย่อยด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ที่มีไททาเนียร้อยละ 5 ของน้ำหนักเส้นด้ายไหม จะให้ผลทดสอบการป้องกันรังสียูวี ความคงทนของสีต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนีย และค่าความแข็งแรงของเส้นด้ายไหมภายหลังการฉายยูวีที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกเส้นด้ายไหมที่สภาวะนี้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายไหมในด้านอื่น ๆ ต่อไป

นอกจากนี้เมื่อทดลองเติมไททาเนียปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักเส้นด้ายไหมลงในซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน พบว่าความขาวของไททาเนียช่วยเพิ่มความสว่าง (ค่า L*) ของสีเส้นด้ายไหม อีกทั้งยังช่วยเพิ่มค่าสีน้ำเงินให้มากขึ้น (b* เป็นลบมากขึ้น) จึงกล่าวได้ว่าการเติมไททาเนียช่วยเพิ่มความเด่นชัดของสีของเส้นด้ายไหมให้มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับที่ย้อมด้วยสีเหลือง

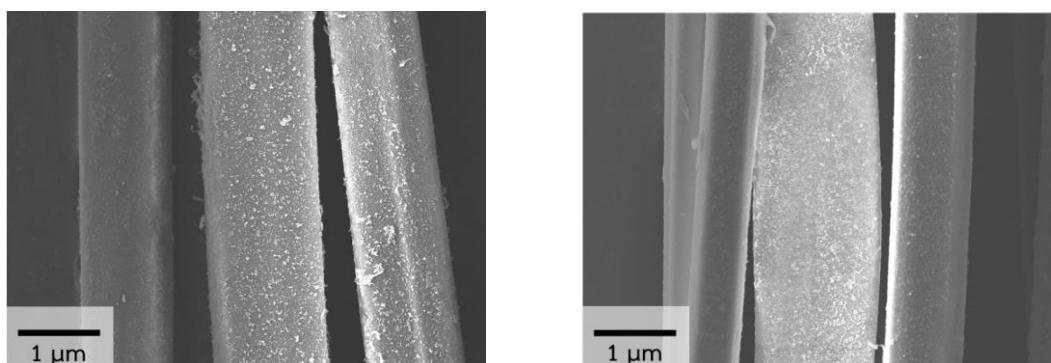
ตารางที่ 4.4 ค่าสี $L^*a^*b^*$ ตามระบบ CIELAB ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินที่มีและไม่มีการเติมไททาเนีย ร้อยละ 5

ค่าสี	เส้นด้ายไหมสีน้ำเงินไม่เติมไททาเนีย	เส้นด้ายไหมสีน้ำเงินเติมไททาเนีย
รูปถ่าย		
L^*	56.26 ± 0.26	57.49 ± 0.39
a^*	2.52 ± 0.14	2.69 ± 0.05
b^*	-6.45 ± 0.20	-8.13 ± 0.12
ΔE	2.09 ± 0.18	

4.5 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถเคลือบบนผิวเส้นไหมได้ด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต ส่วนไททาเนียเคลือบบนผิวของเส้นด้ายไหมด้วยการดูดซับทางกายภาพ โดยไม่มีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอนุภาคไททาเนียกับเส้นด้ายไหม จึงทำให้การเคลือบติดผิวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียบนผิวเส้นไหมไม่มีความทนทานมากนัก และอาจหลุดออกได้เมื่อนำไปซักทำความสะอาด ดังนั้นจึงเพิ่มความสามารถในการยึดติดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียบนผิวของเส้นด้ายไหม โดยการเคลือบด้วยสารยึดติดพอลิอะคริลิก (polyacrylic binder) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารยึดติดพอลิอะคริลิกที่มีชื่อทางการค้า คือ RUCO-PLAST PCA (PCA) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยเพิ่มการติดทนของสีย้อมแก่สิ่งทอ

รูปที่ 4.39 แสดงภาพถ่ายจาก FESEM เปรียบเทียบก่อนและหลังเคลือบเส้นด้ายไหมที่มีอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียด้วย PCA พบว่า ก่อนเคลือบด้วย PCA ผิวของเส้นด้ายไหมจะมีลักษณะขรุขระ เนื่องมีการกระจายของอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียอยู่ทั่วพื้นผิว ในขณะที่ผิวของเส้นด้ายไหมหลังเคลือบด้วย PCA จะมีลักษณะเรียบตลอดทั้งพื้นผิว



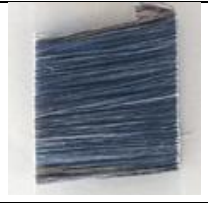



(ก)

(ข)

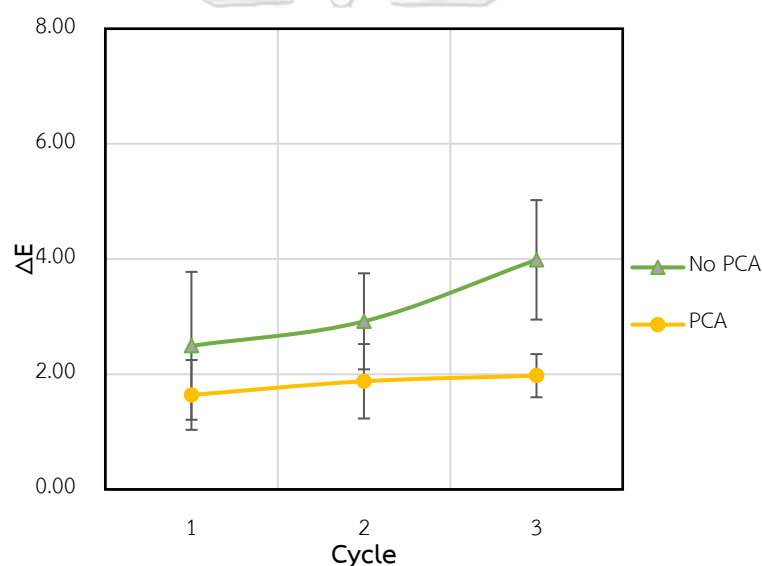
รูปที่ 4.39 ภาพถ่าย FESEM ลักษณะพื้นผิวของเส้นไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย (ก) ก่อนและ (ข) หลัง เคลือบด้วย PCA

ซึ่งค่าสี $L^*a^*b^*$ ตามระบบ CIELAB ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินและสีเหลืองที่มีอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียก่อนและหลังเคลือบด้วย PCA แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า เส้นด้ายไหมสีน้ำเงินและสีเหลืองหลังเคลือบด้วย PCA จะมีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 4.54 ± 0.72 และ 4.89 ± 0.78 ตามลำดับ โดยหลังเคลือบด้วย PCA เส้นด้ายไหมทั้งสองสีมีค่า L^* หรือค่าความสว่างจะลดลง และมีค่า b^* เพิ่มขึ้นหรือไปทางบวกมากขึ้น แสดงว่ามีความเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความเหลืองของ PCA ส่วนค่า a^* ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในขณะที่เส้นด้ายไหมสีเหลืองจะมีค่า a^* เพิ่มขึ้นหรือมีความแดงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าสี $L^*a^*b^*$ ตามระบบ CIELAB ของเส้นด้ายไหมสีน้ำเงินและสีเหลืองที่มีอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียก่อนและหลังเคลือบด้วย PCA

ค่าสี	เส้นด้ายไหมสีน้ำเงิน		เส้นด้ายไหมสีเหลือง	
	ก่อนเคลือบ PCA	หลังเคลือบ PCA	ก่อนเคลือบ PCA	หลังเคลือบ PCA
ภาพถ่าย				
L^*	54.89 ± 0.85	52.01 ± 0.46	77.81 ± 0.15	76.20 ± 0.41
a^*	2.29 ± 0.18	2.28 ± 0.50	0.71 ± 0.05	1.29 ± 0.36
b^*	-11.78 ± 0.14	-8.27 ± 0.66	20.66 ± 0.18	25.24 ± 0.86
ΔE	4.54 ± 0.72		4.89 ± 0.78	

โดยเมื่อนำเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบด้วย PCA ไปทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยน้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 3 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.40 พบว่า ค่าความแตกต่างของสีเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการซักเพิ่มขึ้น โดยค่าความแตกต่างของสีของเส้นด้ายไหมที่ไม่ได้เคลือบด้วย PCA อยู่ในช่วง 2.5 – 4.0 ถือว่ามีค่าต่ำ แสดงว่าเส้นด้ายไหมที่ไม่ได้เคลือบด้วย PCA มีความคงทนของสีต่อการซักล้างดีและมีการหลุดของอนุภาคระหว่างการซักไม่มาก ส่วนเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วย PCA จะมีค่าความต่างของสีอยู่ในช่วง 1.6 – 2.0 ถือว่ามีค่าต่ำมาก และมีค่าน้อยกว่าค่าความแตกต่างของสีหลังซักล้างของเส้นด้ายไหมที่ไม่ได้เคลือบด้วย PCA แสดงว่าการเคลือบด้วย PCA สามารถเพิ่มความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยน้ำสะอาดอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสให้แก่เส้นด้ายไหมได้

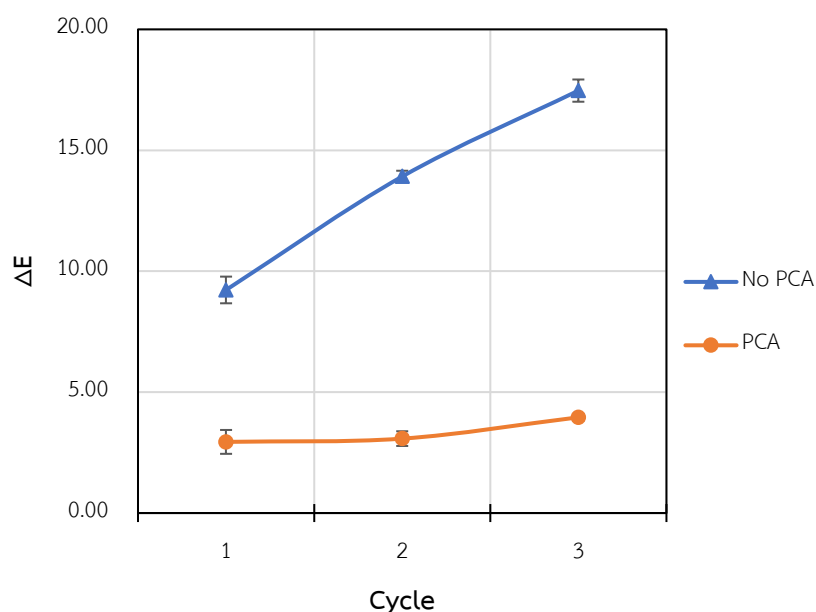


รูปที่ 4.40 ค่าความแตกต่างของสีของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย หลังการซักล้างด้วยน้ำสะอาดอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสต่อจำนวนรอบการซักล้าง

ต่อมาเมื่อทำการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยน้ำสบู่ตามมาตรฐาน ISO 105-C01: 1989 (E) ของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบด้วย PCA ให้ผลค่าความแตกต่างของสีหลังซักดังแสดงในรูปที่ 4.41 โดยจะเห็นได้ว่าเส้นด้ายไหมที่ไม่ได้เคลือบด้วย PCA จะมีความคงทนต่อการซักล้างด้วยน้ำสบู่ต่ำมาก โดยค่าความแตกต่างของสีอยู่ในช่วง 9.0 – 17.5 แสดงว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียที่เกาะอยู่บนผิวของเส้นด้ายไหมหลุดออกไปจนเกือบหมด ซึ่งแตกต่างจากผลจากการซักล้างด้วยน้ำสะอาด เนื่องจากน้ำสบู่มีความเป็นด่าง และมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับประมาณ 8 – 9 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไหมมี

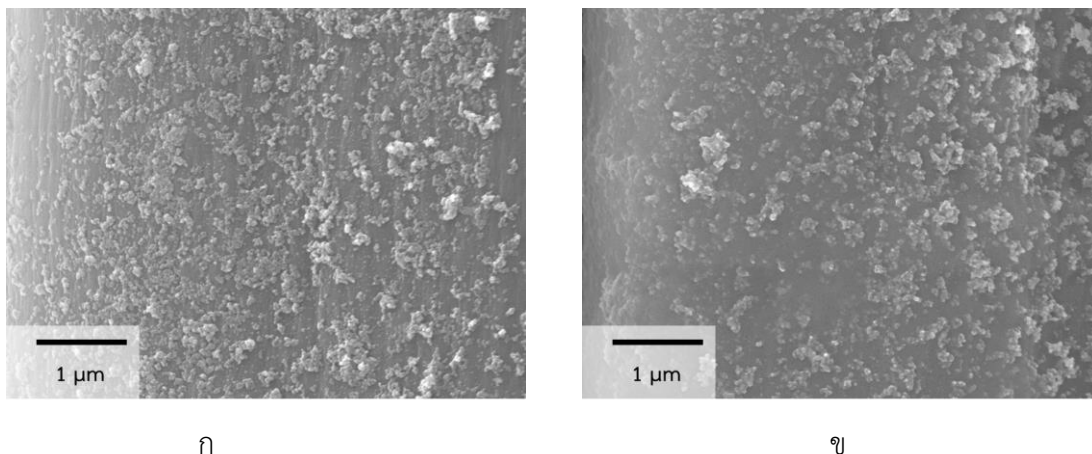
ความสามารถทนความเป็นกรด - ต่างในช่วงค่าค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับระหว่าง 4 – 8 ดังนั้นความเป็นต่างของน้ำสบู่อาจไปทำลายเส้นด้ายไหมทำให้อนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวเกิดการหลุดออกมา นอกจากนี้เส้นไหมในสถานะที่เป็นต่างจะแสดงประจุที่ผิวเป็นลบจึงอาจเกิดแรงผลักกับประจุลบที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ซึ่งเป็นตัวให้สีเกิดการหลุดออกมา ส่งผลให้เส้นด้ายไหมหลังการซักล้างมีสีจางลง ในขณะที่เส้นด้ายไหมที่ผ่านการเคลือบด้วย PCA มีค่าความแตกต่างของสีอยู่ในช่วง 3.0 – 4.0 แสดงว่ามีการหลุดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียบนเส้นด้ายไหมน้อย ซึ่งการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วย PCA จะสามารถเพิ่มคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยน้ำสบู่ได้

โดย PCA หรือกรดพอลิอะคริลิกจะเกิดการเชื่อมโยงข้าม (cross-linking) กับกับหมู่คาร์บอกซิลิกของเส้นไหม ซึ่งจะช่วยตรึง (entrapped) อนุภาคที่กระจายอยู่บนผิวของเส้นด้ายไหม^[42] ส่งผลให้ผลอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียอยู่ติดแน่นบนผิวของเส้นด้ายไหมมากขึ้น ทำให้ความคงทนของสีต่อการซักล้างมากขึ้น



รูปที่ 4.41 ค่าความแตกต่างของสีของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนีย หลังการซักล้างด้วยน้ำสบู่ตามมาตรฐาน ISO 105-C01: 1989 (E) ต่อจำนวนรอบการซักล้าง

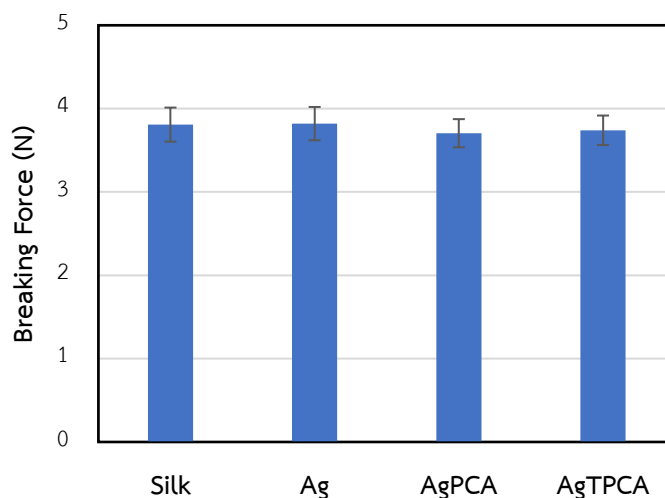
รูปที่ 4.42 (ก - ข) แสดงภาพพื้นผิวของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA ก่อนและหลังการซักล้างด้วยน้ำสบู่ตามมาตรฐาน ISO 105-C01: 1989 (E) พบว่าหลังการซักล้างด้วยน้ำสบู่ อนุภาคบนผิวของเส้นด้ายมีจำนวนลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการซักล้าง ซึ่งการลดลงของจำนวนอนุภาคส่งผลให้สีของเส้นด้ายไหมหลังซักจางลง



รูปที่ 4.42 ภาพ FESEM แสดงผิวของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA (ก) ก่อนและ (ข) หลังซักล้างด้วยน้ำสบู่อตามมาตรฐาน ISO 105-C01: 1989 (E)

4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นด้ายไหมหลังการเคลือบด้วยที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA

ความแข็งแรงของเส้นด้ายไหมสามารถตรวจสอบได้จากค่าแรงดึงที่จุดขาด (breaking force) ดังแสดงในรูปที่ 4.43 พบว่า ค่าแรงดึงที่จุดขาดของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Silk), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA (AgPCA) และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA (AgTPCA) มีค่าเท่ากับ 3.808 ± 0.20 นิวตัน, 3.820 ± 0.20 นิวตัน, 3.71 ± 0.17 นิวตัน และ 3.74 ± 0.18 นิวตัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าแรงดึงที่จุดขาดของตัวอย่างที่เคลือบด้วย PCA จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการบ่ม (curing) เส้นด้ายไหมภายหลังการเคลือบที่อุณหภูมิสูง 130 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดลงเพียงเล็กน้อยนี้ถือว่าไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นด้ายไหมที่เด่นชัด แสดงว่าการเคลือบผิวของเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคซิลเวอร์ หรืออนุภาคซิลเวอร์/ไททาเนีย และ PCA ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นด้ายไหม

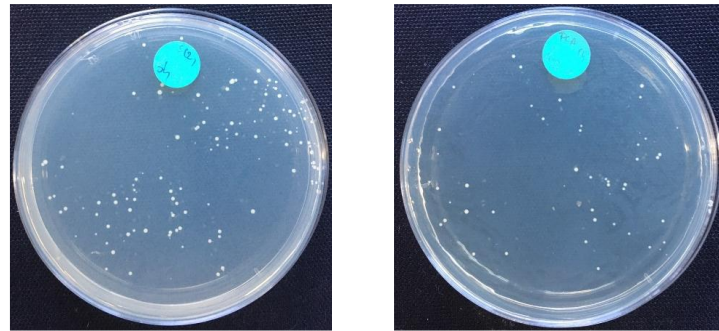


รูปที่ 4.43 ค่าแรงดึงที่จุดขาด (breaking force) ของเส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Silk), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA (AgPCA) และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA (AgTPCA)

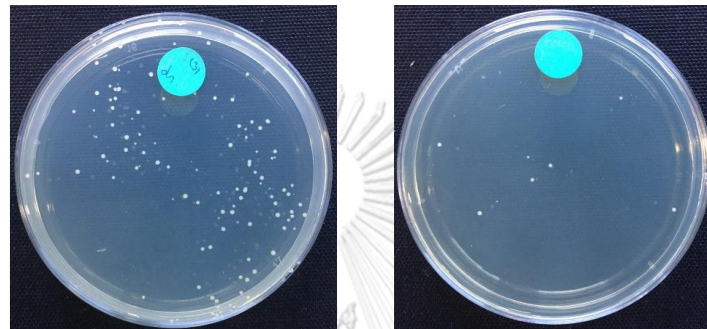
4.7 ผลการทดสอบความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียของเส้นด้ายไหม

จากการทดสอบความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA (รูปที่ 4.44) พบว่า หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง จานเพาะเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ที่ทดสอบกับเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA จะมีโคโลนีของแบคทีเรียเล็กน้อย

โดยร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ดังแสดงในรูปที่ 4.45 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA (AgPCA) และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA (AgTPCA) พบว่าการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วย PCA จะทำให้ความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียลดลงเพียงเล็กน้อยจากร้อยละ 99.98 เป็นร้อยละ 99.97 ซึ่งความแตกต่างเพียงเล็กน้อยนี้อาจเป็นผลมาจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์ถูกตรึงไว้บนผิวของเส้นด้ายไหมด้วย PCA ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์เข้าไปทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ยากขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มไททาเนียลงบนผิวของเส้นด้ายไหม ความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียของไททาเนียหลังถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวีจะช่วยเพิ่มความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียของเส้นด้ายไหมได้ ทำให้ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียมีค่ามากขึ้นเป็นร้อยละ 99.99

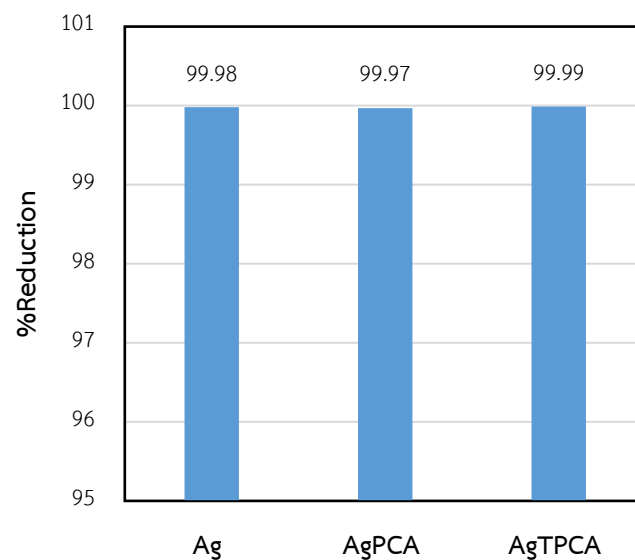


ก



ข

รูปที่ 4.44 จำนวนแบคทีเรีย *S. aureus*. ในเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA (ก) และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA (ข) ที่เวลา 0 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^{-3} (ซ้าย) และ 24 ชั่วโมง ที่การเจือจาง 10^0 (ขวา)



รูปที่ 4.45 ร้อยละการลดลงของจำนวนแบคทีเรียชนิด *S. aureus*. ของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag), เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และ PCA (AgPCA) และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททาเนีย/ PCA (AgTPCA)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียเพื่อเพิ่มสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียให้แก่เส้นด้ายไหม ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีสังเคราะห์ได้ด้วยปฏิกิริยาเคมีรีดักชันที่อาศัยโซเดียมบอโรไฮไดรด์ (NaBH_4) เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งการมีสีสังที่แตกต่างกันของซิลเวอร์คอลลอยด์เป็นผลมาจากสมบัติ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สามารถดูดกลืนแสงเฉพาะช่วงความยาวคลื่นหนึ่งขึ้นกับขนาดหรือรูปร่างของอนุภาค โดยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน – สีม่วงแดง จะมีรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงนาโนปริซึม ในขณะที่ซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำตาล – สีส้ม – สีเหลือง จะมีรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลม ซึ่งซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีที่สังเคราะห์ได้สามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus*. ได้ดีเยี่ยม โดยมีร้อยละการลดลงของจำนวนเชื้อแบคทีเรีย (%Reduction) ชนิด *E. coli* และ *S. aureus*. เท่ากับ 100

5.1.2 การทำปฏิกิริยาร่วมกันของซิเตรตไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มีความสำคัญอย่างมากในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีรูปร่างนาโนปริซึม เนื่องจากซิเตรตไอออนจะทำหน้าที่ป้องกันหน้า {111} ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ในขณะที่ H_2O_2 จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในบริเวณหน้าอื่น ๆ ที่เหลือ ส่งผลให้เกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทรงนาโนปริซึมขึ้น นอกจากนี้ซิเตรตไอออนยังช่วยรักษาความเสถียรของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เนื่องจากหลังการทำปฏิกิริยาซิเตรตไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจะอยู่ล้อมรอบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค อีกทั้งยังส่งผลให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีค่าศักย์ゼต้าเป็นลบอีกด้วย

5.1.3 ปริมาณ NaBH_4 และความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตส่งผลต่อการจับตัวกันระหว่างซิลเวอร์ไอออนกับซิเตรตไอออน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลเวอร์ไอออนและ NaBH_4 มีความไวมากกว่าการจับตัวกันระหว่างซิลเวอร์ไอออนและซิเตรต

ไอออน ดังนั้นเมื่อปริมาณ NaBH_4 และความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเพิ่มขึ้น โอกาสการเกิดอนุภาคนาโนซิลเวอร์รูปทรงนาโนปริซึมจึงลดลง

- 5.1.4 ค่าความเป็นกรด - ต่างส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของซิลเวอร์คอลลอยด์ โดยที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 4 อนุภาคนาโนซิลเวอร์จะสูญเสียความเสถียรและเกิดการละลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจาก H^+ ได้เป็น Ag^+ ส่งผลให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในระบบมีขนาดและจำนวนลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาค ทำให้สีของซิลเวอร์คอลลอยด์เปลี่ยนไป
- 5.1.5 เส้นด้ายไหมสามารถย้อมสีได้ด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยวิธีการจุ่มแช่ เมื่อค่าความเป็นกรด - ต่างของคอลลอยด์เท่ากับ 4 และ 5 เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรด เส้นด้ายไหมจะมีประจุที่ผิวเป็นบวก ซึ่งเกิดจากหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) ในเส้นด้ายไหมสามารถดูดซับ H^+ จากกรดได้เป็น NH_3^+ จากนั้นประจุบวกที่ผิวของเส้นด้ายไหมจะเกิดแรงดึงดูดกับประจุลบที่ผิวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถเคลือบติดบนผิวของเส้นไหมได้ และสีที่เกิดขึ้นของเส้นด้ายไหมก็มาจากสีของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดหรือรูปร่างต่างกัน โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถเคลือบติดที่ผิวของเส้นด้ายไหมได้ภายในเวลา 15 นาที และจะให้สีเข้มสุดที่ 45 - 60 นาที ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์ สามารถเพิ่มความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียให้แก่เส้นด้ายไหมได้ โดยเส้นด้ายไหมที่มีอนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli*. และ *S. aureus*. ได้ดีเยี่ยม (%Reduction = 99.98% - 100%)
- 5.1.6 เมื่อเติมไททานีลลงในซิลเวอร์คอลลอยด์ที่ใช้ย้อมสีเส้นด้ายไหม ความขาวของไททานีลจะส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ของสีเพิ่มขึ้นและทำให้เฉดสีชัดขึ้น โดยไททานีลสามารถกระจายได้ดีบนผิวของเส้นด้ายไหม และเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททานีลจะมีความสามารถในการป้องกันรังสียูวีได้ดี ซึ่งปริมาณไททานีลที่เหมาะสมในการเคลือบบนผิวของเส้นด้ายไหมคือร้อยละ 5 ของน้ำหนักเส้นด้ายไหม เนื่องจากปริมาณดังกล่าวให้ผลทดสอบความคงทนของสีต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททานีลที่ดี โดยค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของเส้นด้ายไหมหลังการฉายแสงยูวีมีค่าต่ำ

5.1.7 การเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยสารยึดติดพอลิอะคริลิกสามารถช่วยเพิ่มความคงทนของสีต่อการซักล้างได้ เนื่องจากสารยึดติดพอลิอะคริลิกจะเกิดการเชื่อมโยงแบบข้าม (cross – linking) กับหมู่คาร์บอกซิลในไหม ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียเคลือบติดบนผิวของเส้นด้ายไหมแน่นขึ้น ซึ่งการเคลือบด้วยสารยึดติดพอลิอะคริลิกจะทำให้สีของเส้นด้ายไหมเหลืองขึ้นเล็กน้อย และยังลดความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียของเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ แต่สำหรับเส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียพบว่าความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากไททาเนียที่เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะสามารถแสดงสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียได้ ดังนั้นไททาเนียจึงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของเส้นด้ายไหมให้ดียิ่งขึ้น

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการย้อมสีเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์หลากสีสันทึบที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเคมีรีดักชัน คือที่ค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5 และระยะเวลาที่ใช้คือ 45 นาที ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งเส้นไหมที่ผ่านการย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิด E. coli. และ S. aureus. ได้ดี เมื่อเพิ่มไททาเนียลงในคอลลอยด์ปริมาณที่เหมาะสม (5% TiO₂) จะช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันรังสียูวีให้แก่เส้นด้ายไหมได้ และการเคลือบเส้นด้ายไหมที่มีอนุภาคนาโนซิลเวอร์และไททาเนียด้วยสารยึดติดพอลิอะคริลิกจะช่วยเพิ่มความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยน้ำและด้วยน้ำสบู่ ดังนั้นการเคลือบเส้นด้ายไหมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ไททาเนีย และสารยึดติดพอลิอะคริลิกจะเพิ่มความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรีย ความสามารถในการป้องกันรังสียูวี และมีความคงทนต่อการซักล้างด้วยน้ำและด้วยน้ำสบู่ได้ดี โดยที่สมบัติเชิงกลและความแข็งแรงของเส้นด้ายไม่เปลี่ยนแปลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการย้อมสีของเส้นด้ายไหมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์
- 5.2.2 ศึกษาการย้อมเส้นด้ายไหมด้วยวิธีอื่น ๆ นอกจากวิธีจุ่มแช่
- 5.2.3 ศึกษาผลของการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนียต่อสารยึดติดพอลิอะคริลิก

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

1. Sonthisombat, A., and P. Speakman, *Silk : queen of fibres – The concise story*. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลชัยบุรี 2546. **4**(2): p. 84 – 97.
2. Padaki, N.V., B. Das, and A. Basu, *1 - Advances in understanding the properties of silk*, in *Advances in Silk Science and Technology*, A. Basu, Editor. 2015, Woodhead Publishing. p. 3-16.
3. Yardpiroon Boonsod, P.S., *Silk: Compositions and Structures, Properties and Applications*. Journal of Science and Technology Mahasarakham University, 2012. **31**: p. 436-442.
4. อุดมกิจเดชา, ว., เส้นใยโปรตีน. วิทยาศาสตร์เส้นใย. 2542, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. Boulet-Audet, M., F. Vollrath, and C. Holland, *Identification and classification of silks using infrared spectroscopy*. The Journal of experimental biology, 2015. **218**(Pt 19): p. 3138-3149.
6. Wang, Z., et al., *Effect of silk degumming on the structure and properties of silk fibroin*. The Journal of The Textile Institute, 2019. **110**(1): p. 134-140.
7. เจนวานิชย์, ช., *Silver (Ag) เงิน*. สารานุกรมธาตุ. 2525: กรุงเทพฯ โอเดียนสโตร์.
8. Zhang, X.-F., et al., *Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches*. International journal of molecular sciences, 2016. **17**(9): p. 1534.
9. Jana, J., M. Ganguly, and T. Pal, *Enlightening surface plasmon resonance effect of metal nanoparticles for practical spectroscopic application*. RSC Advances, 2016. **6**(89): p. 86174-86211.
10. Masson, J.-F., *Portable and field-deployed surface plasmon resonance and plasmonic sensors*. Analyst, 2020. **145**(11): p. 3776-3800.
11. Mendis, P., et al., *Nanosilver rainbow: a rapid and facile method to tune different colours of nanosilver through the controlled synthesis of stable spherical silver nanoparticles*. RSC Advances, 2016. **6**(54): p. 48792-48799.

12. Qing, Y.a., et al., *Potential antibacterial mechanism of silver nanoparticles and the optimization of orthopedic implants by advanced modification technologies*. International journal of nanomedicine, 2018. **13**: p. 3311-3327.
13. กรโกร, ก., และ ร. ภัทรมานนท์, *อนุภาคเงินนาโนสังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชและความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์*. KKU Science Journal, 2560. **45**: p. 34-52.
14. Gulrajani, M.L., et al., *Preparation and application of silver nanoparticles on silk for imparting antimicrobial properties*. Journal of Applied Polymer Science, 2008. **108**(1): p. 614-623.
15. Pris, M., *Influence of Different Parameters on Wet Synthesis of Silver Nanoparticles*. 2014, University of Twente. p. 43.
16. Fernando, I. and Y. Zhou, *Impact of pH on the stability, dissolution and aggregation kinetics of silver nanoparticles*. Chemosphere, 2019. **216**: p. 297-305.
17. Rafique, M., et al., *Laser ablation synthesis of silver nanoparticles in water and dependence on laser nature*. Optical and Quantum Electronics, 2019. **51**(6): p. 179.
18. He, H., et al., *In situ green synthesis and characterization of sericin-silver nanoparticle composite with effective antibacterial activity and good biocompatibility*. Materials Science and Engineering: C, 2017. **80**: p. 509-516.
19. Métraux, G.S. and C.A. Mirkin, *Rapid Thermal Synthesis of Silver Nanoprisms with Chemically Tailorable Thickness*. Advanced Materials, 2005. **17**(4): p. 412-415.
20. Tsuji, M., et al., *Rapid Transformation from Spherical Nanoparticles, Nanorods, Cubes, or Bipyramids to Triangular Prisms of Silver with PVP, Citrate, and H₂O₂*. Langmuir, 2012. **28**(24): p. 8845-8861.
21. Parnklang, T., et al., *Shape transformation of silver nanospheres to silver nanoplates induced by redox reaction of hydrogen peroxide*. Materials Chemistry and Physics, 2015. **153**: p. 127-134.
22. Moazami, A., et al., *Antibacterial Properties of Raw and Degummed Silk with Nanosilver in Various Conditions*. Journal of Applied Polymer Science, 2010. **118**: p. 253-258.

23. Tang, B., et al., *Application of anisotropic silver nanoparticles: Multifunctionalization of wool fabric*. Journal of Colloid and Interface Science, 2011. **356**(2): p. 513-518.
24. Tang, B., et al., *Coloration of Cotton Fibers with Anisotropic Silver Nanoparticles*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012. **51**(39): p. 12807-12813.
25. Tang, B., et al., *Colorful and Antibacterial Silk Fiber from Anisotropic Silver Nanoparticles*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013. **52**(12): p. 4556-4563.
26. Jafari, N., et al., *Effect of Silver Particle size on color and Antibacterial properties of silk and cotton Fabrics*. Fibers and Polymers, 2016. **17**(6): p. 888-895.
27. Mahmud, S., et al., *UV Protection and Antibacterial Treatment of Wool using Green Silver Nanoparticles*. Asian Journal of Chemistry, 2018. **30**: p. 116-122.
28. Information, N.C.f.B. *Titanium dioxide*. PubChem Compound Summary for CID 26042 2020 [31/7/2020]; Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Titanium-dioxide>.
29. Janzeer, Y., *Surface Modification of Titanium and Titanium Alloys to Enhance Bone Healing*. 2013.
30. Hanaor, D. and C. Sorrell, *Review of the Anatase to Rutile Phase Transformation*. Journal of Materials Science, 2011. **46**: p. 855-874.
31. ชีรการุณวงศ์, ช., *ไทเทเนียมไดออกไซด์: วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย*. KKU Science Journal, 2012. **40**: p. 1049-1058.
32. Baloyi, S. and J. Moma, *Modified Titanium Dioxide for Photocatalytic Applications*. 2019.
33. Fujishima, A., T.N. Rao, and D.A. Tryk, *Titanium dioxide photocatalysis*. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2000. **1**(1): p. 1-21.
34. Fujishima, A. and X. Zhang, *Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches*. Comptes Rendus Chimie, 2006. **9**(5): p. 750-760.

35. Mull, B., L. Möhlmann, and O. Wilke, *Photocatalytic Degradation of Toluene, Butyl Acetate and Limonene under UV and Visible Light with Titanium Dioxide-Graphene Oxide as Photocatalyst*. *Environments*, 2017. **4**: p. 9.
36. Regmi, C., et al., *Understanding Mechanism of Photocatalytic Microbial Decontamination of Environmental Wastewater*. *Frontiers in chemistry*, 2018. **6**: p. 33-33.
37. Li, G., et al., *Chemical assembly of TiO₂ and TiO₂@Ag nanoparticles on silk fiber to produce multifunctional fabrics*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011. **358**(1): p. 307-315.
38. Rahman, M., M. Solaiman, and E. Khalil, *Effect of Titanium Dioxide Treatment on the Properties of 100% Cotton Knitted Fabric*. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2014. **3**: p. 87-90.
39. Doganli, G., et al., *Functionalization of cotton fabric with nanosized TiO₂ coating for self-cleaning and antibacterial property enhancement*. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2015. **13**: p. 1-9.
40. Jafari-Kiyan, A., L. Karimi, and A. Davodiroknabadi, *Producing colored cotton fabrics with functional properties by combining silver nanoparticles with nano titanium dioxide*. *Cellulose*, 2017. **24**(7): p. 3083-3094.
41. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรดอะคริลิก (Acrylic acid). 2551: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
42. Nadiger, V.G. and S.R. Shukla, *Antimicrobial treatment of silk with silver nanoparticles using acrylic binder*. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 2017. **42**: p. 465-473.
43. Bunyakan, C. and D. Hunkeler, *Precipitation polymerization of acrylic acid in toluene. I: synthesis, characterization and kinetics*. *Polymer*, 1999. **40**(23): p. 6213-6224.
44. Aonfak, K., et al., *Dyeing Polyester Fabrics with Curcumin using Infrared Dyeing Machine*. *Burapha Science Journal*, 2016. **21**: p. 23-37.
45. Martin, T.P., et al., *Initiated chemical vapor deposition of antimicrobial polymer coatings*. *Biomaterials*, 2007. **28**(6): p. 909-915.

46. Shateri-Khalilabad, M. and M. Yazdanshenas, *Bifunctionalization of cotton textiles by ZnO nanostructures: Antimicrobial activity and ultraviolet protection*. Textile Research Journal, 2013. **83**: p. 993-1004.
47. Swofford, H., *An Overview of Antimicrobial Testing for Textile Applications*. AATCC Review, 2010. **10**: p. 51-55.
48. Ghosh, A., et al., *Optimization of Knitted Fabric Comfort and UV Protection using Desirability Function*. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2016. **11**(4): p. 155892501601100404.
49. Mohammad Mahbubul Alam, M.T.I., *A Review on Ultraviolet Protection of Textiles*. International Journal of Engineering Technology Science and Research, 2017. **4**(8): p. 404-412.
50. Algar, W.R., et al., *Demonstration of the Spectrophotometric Complementary Color Wheel Using LEDs and Indicator Dyes*. Journal of Chemical Education, 2016. **93**(1): p. 162-165.
51. Boundless, *Absorption of Light*, in *General Biology*. 2020, LibreTexts. p. 263-265.
52. Clark, J., *The Visible Spectrum and Color*, in *Organic Chemistry*. 2014. p. 8.
53. Institute for Innovative Learning, M.U. *Visible light*. 25/08/2020]; Available from:
http://www.atom.mutphysics.com/charud/oldnews/0/286/12/6/CD/colorandLight/page1_4.html
54. Selim, Y. and A. Mohamed, *Role of Dyestuff in Improving Dye-Sensitized Solar Cell Performance*. Renewable Energy and Sustainable Development, 2017. **3**: p. 79-82.
55. Millstone, J.E., et al., *Colloidal Gold and Silver Triangular Nanoprisms*. Small, 2009. **5**(6): p. 646-664.
56. Sharma, E. and M. Gahlot, *Comparative study of dyeing of silk using acid, basic and reactive dye*. 2004. **13**: p. 98-100.
57. Bélteky, P., et al., *Silver nanoparticles: Aggregation behavior in biorelevant conditions and its impact on biological activity*. International Journal of Nanomedicine, 2019. **14**: p. 667-687.

58. Sedira, S., et al., *Silver nanoparticles in combination with acetic acid and zinc oxide quantum dots for antibacterial activities improvement—A comparative study*. Applied Surface Science, 2014. **311**: p. 659-665.
59. Pavan M. V. Raja, A.R.B., *Synthesis of noble metal nanoparticles*. Physical Methods in Chemistry and Nano Science. 2015.
60. Agnihotri, S., S. Mukherji, and S. Mukherji, *Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5–100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy*. RSC Advances, 2014. **4**(8): p. 3974-3983.
61. Helmlinger, J., et al., *Silver nanoparticles with different size and shape: equal cytotoxicity, but different antibacterial effects*. RSC Advances, 2016. **6**(22): p. 18490-18501.
62. Todar, K., *Structure and Function of Bacterial Cells*. The Good, the Bad, and the Deadly. 2004. 10.
63. Mahmud, S., et al., *UV Protection and Antibacterial Treatment of Wool using Green Silver Nanoparticles*. Asian Journal of Chemistry, 2018. **30**: p. 116-122.
64. Yang, H., S. Zhu, and N. Pan, *Studying the mechanisms of titanium dioxide as ultraviolet-blocking additive for films and fabrics by an improved scheme*. Journal of Applied Polymer Science, 2004. **92**(5): p. 3201-3210.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

AATCC Test Method 183-2004

Transmittance or Blocking of Erythemally Weighted Ultraviolet Radiation through Fabrics

Developed in 1998 by AATCC Committee RA106; reaffirmed 1999, 2000; revised 2004.

1. Purpose and Scope

1.1 This standard test method is used to determine the ultraviolet radiation blocked or transmitted by textile fabrics intended to be used for UV protection.

1.2 This method provides procedures for measuring this fabric property with specimens in either the dry or wet states.

2. Principle

2.1 The transmission of ultraviolet radiation (UV-R) through a specimen is measured on a spectrophotometer or spectroradiometer at known wavelength intervals.

2.1.1 The ultraviolet protection factor (UPF) is computed as the ratio of the erythemally weighted ultraviolet radiation (UV-R) irradiance at the detector with no specimen to the erythemally weighted UV-R irradiance at the detector with a specimen present.

2.1.2 The erythemally weighted UV-R irradiance at the detector with no specimen present is equal to the summation between wavelength intervals of the measured spectral irradiance times the relative spectral effectiveness for the relevant erythemal action spectra times the UV-R weighting function of the appropriate solar radiation spectrum times the appropriate wavelength interval.

2.1.3 The erythemally weighted UV-R irradiance at the detector with a specimen present is equal to the summation between wavelength intervals of the measured spectral irradiance times the relative spectral effectiveness for the relevant erythemal action spectrum times the spectral transmittance for the specimen times the wavelength interval.

2.1.4 The percent blocking of UVA and UVB radiation is also calculated.

3. Terminology

3.1 erythema, n.—abnormal redness of the skin (sunburn) due to capillary congestion (as in inflammation).

3.2 percent UV blocking, n.—100 minus the UV transmission.

3.3 ultraviolet protection factor (UPF), n.—the ratio of the average effective ultraviolet radiation (UV-R) irradi-

ance transmitted and calculated through air to the average effective UV-R irradiance transmitted and calculated through fabric.

3.4 ultraviolet radiation, n.—radiant energy for which the wavelengths of the monochromatic components are smaller than those for visible radiation and more than about 100 nm.

NOTE: The limits of the spectral range of ultraviolet radiation are not well defined and may vary according to the user. Committee E-2.1.2 of the International Commission on Illumination (CIE) (see 15.4) distinguishes in the spectral range between 400 and 100 nm:

UV-A	315-400 nm
UV-B	280-315 nm
UV-R	280-400 nm

4. Safety Precautions

NOTE: These safety precautions are for information purposes only. The precautions are ancillary to the testing procedures and are not intended to be all inclusive. It is the user's responsibility to use safe and proper techniques in handling materials in this test method. Manufacturers MUST be consulted on specific details such as material safety data sheets and other manufacturer's recommendations. All OSHA standards and rules must also be consulted and followed.

4.1 Under any circumstances, do not look directly at the equipment and materials that may increase the light source intensity, such as mirrors.

4.2 Good laboratory practices should be followed. Wear prescribed safety glasses in all laboratory areas.

5. Uses and Limitations

5.1 This method can also be used to determine the UPF of fabrics in a stretched state. However, the techniques for stretching the specimens are not part of this method and are addressed in a separate test procedure. It must be noted that stretching the specimens could change the UPF properties.

6. Apparatus and Materials

6.1 A spectrophotometer or spectroradiometer equipped with an integrating sphere (see 15.1 and, for a more complete description of an instrument, Appendix A).

6.2 As indexed in catalogues: Filter, Schott Glass UG11 (see 15.2).

6.3 Clear plastic food wrap for use with wet samples (polyvinylidene chloride or polyvinylchloride film).

6.4 AATCC Blotting paper (see 15.5).

7. Instrument Verification and Calibration

7.1 Calibration. Calibrate the spectrophotometer or spectroradiometer according to manufacturer instructions. The use of physical standards are recommended for validating the measurement of spectral transmittance.

7.1.1 When running a wet sample place the plastic wrap over the port and repeat calibration.

7.2 Wavelength scale. Calibrate the wavelength scale of the spectrophotometer or spectroradiometer using the spectral emission lines of an electrical discharge in mercury vapor. The wavelength calibration of a spectrophotometer can be performed using the absorption spectra of a holmium oxide glass filter. Reference wavelengths for both mercury arc emission and holmium oxide absorption are provided in ASTM Practice E 275, Standard Practice for Describing and Measuring Performance of Ultraviolet, Visible and Near-Infrared Spectrophotometers.

7.2.1 Transmittance scale. Set the transmittance scale to a 100% value by operating the instrument without a sample in the optical path; therefore, referenced to air. The 0% value can be subsequently verified by fully obstructing the sample beam path with an opaque material. Validate the linearity of the transmittance scale by means of either calibrated neutral density filters or calibrated perforated screens supplied by the instrument manufacturer or standardizing laboratories.

8. Specimens

8.1 Test a minimum of two (2) specimens from each sample for the wet and the dry testing. Cut each specimen at least 50 × 50 mm (2.0 × 2.0 in.) or 50 mm (2.0 in.) in diameter. Avoid distorting the specimen during preparation and handling.

8.1.1 Should the fabric have areas of different colors or structure, test each color or structure if its size is sufficient to cover the measuring port.

8.2 See Appendix A5 for specimens exhibiting fluorescence.

9. Conditioning

9.1 For dry specimens.

9.1.1 Prior to testing, precondition and condition the test specimens as directed in ASTM D 1776, Standard Practice for Conditioning and Testing Textiles. Condition each specimen for at least 4 h in an atmosphere of $21 \pm 1^\circ\text{C}$ ($70 \pm 2^\circ\text{F}$) and $65 \pm 2\%$ RH by laying each test specimen separately on a perforated shelf or conditioning rack.

10. Procedure

10.1 Dry Evaluation.

10.1.1 Place the specimen flush against the sample transmission port opening in the sphere.

10.1.2 Make one UV transmission measurement with the specimen oriented in one direction, a second measurement at 0.79 rad (45°) to the first and a third at 0.79 rad (45°) to the second. Record the individual measurements.

10.1.3 On multicolored specimens, determine the area of highest UV transmission and make the three measurements in that area.

10.2 Wet Evaluation

10.2.1 Weigh the test specimen. Thoroughly wet out the specimen in distilled water by placing it flat in the bottom of a beaker and then pour distilled water into the beaker until the specimen is covered. Allow the specimen to remain submerged for 30 minutes. Press and move the specimen from time to time to ensure a good and uniform penetration. Prepare only one specimen at a time.

10.2.2 Bring the wet pick-up to $150 \pm 5\%$ by squeezing the wet specimen between blotting paper (see 6.4) through a hand wringer or similar convenient means (such as squeeze between two glass rods). If the fabric has low moisture absorption, repeat the soaking and wringing steps. Note, some samples may not be capable of achieving the specified wet pick-up such as tightly woven synthetic fabrics.

10.2.3 Use plastic wrap over viewing port to protect instrument from water.

10.2.4 Continue as directed in 10.1. Avoid evaporative reduction of the moisture content below the specified level before the actual UV transmission measurements are made.

11. Calculations

11.1 Calculate the average spectral transmittance for the three measurements on each specimen.

11.2 Calculate the Ultraviolet Protection Factor (UPF) of each specimen using Equation 1:

Table I—Relative Erythral Effectiveness Function (E_r)^a

nm	response	nm	response	nm	response
280	1.00e+00	320	8.55e-03	360	4.84e-04
282	1.00e+00	322	5.55e-03	362	4.52e-04
284	1.00e+00	324	3.60e-03	364	4.22e-04
286	1.00e+00	326	2.33e-03	366	3.94e-04
288	1.00e+00	328	1.51e-03	368	3.67e-04
290	1.00e+00	330	1.36e-03	370	3.43e-04
292	1.00e+00	332	1.27e-03	372	3.20e-04
294	1.00e+00	334	1.19e-03	374	2.99e-04
296	1.00e+00	336	1.11e-03	376	2.79e-04
298	1.00e+00	338	1.04e-03	378	2.60e-04
300	6.49e-01	340	9.66e-04	380	2.43e-04
302	4.21e-01	342	9.02e-04	382	2.26e-04
304	2.73e-01	344	8.41e-04	384	2.11e-04
306	1.77e-01	346	7.85e-04	386	1.97e-04
308	1.15e-01	348	7.33e-04	388	1.84e-04
310	7.45e-02	350	6.84e-04	390	1.72e-04
312	4.83e-02	352	6.38e-04	392	1.60e-04
314	3.13e-02	354	5.96e-04	394	1.50e-04
316	2.03e-02	356	5.56e-04	396	1.40e-04
318	1.32e-02	358	5.19e-04	398	1.30e-04
				400	1.22e-04

Note: The intervals in Table I are in 2 nm. For 5 nm UV transmission data use the interpolated data between those ending in a "4" and a "6."

^a CIE Publication 106/4 available from CIE National Committee of USA, c/o TLA-Lighting Consultants Inc., 7 Pond St., Salem, MA 01970.

Table II—Solar Spectral Irradiance of Noonday, July 3, Sunlight, Albuquerque, NM (S_e)^a

nm	W/cm ² /nm	nm	W/cm ² /nm	nm	W/cm ² /nm
280	4.12e-11	320	3.14e-05	360	5.64e-05
282	2.37e-11	322	3.32e-05	362	6.00e-05
284	3.14e-11	324	3.61e-05	364	6.48e-05
286	4.06e-11	326	4.45e-05	366	7.18e-05
288	6.47e-11	328	5.01e-05	368	7.62e-05
290	3.09e-10	330	5.32e-05	370	7.66e-05
292	2.85e-09	332	5.33e-05	372	7.50e-05
294	2.92e-08	334	5.23e-05	374	6.61e-05
296	1.28e-07	336	5.04e-05	376	6.66e-05
298	3.37e-07	338	4.99e-05	378	7.46e-05
300	8.64e-07	340	5.39e-05	380	7.54e-05
302	2.36e-06	342	5.59e-05	382	6.42e-05
304	4.35e-06	344	5.35e-05	384	5.85e-05
306	7.19e-06	346	5.34e-05	386	6.26e-05
308	9.68e-06	348	5.37e-05	388	6.72e-05
310	1.34e-05	350	5.59e-05	390	7.57e-05
312	1.75e-05	352	5.89e-05	392	7.16e-05
314	2.13e-05	354	6.13e-05	394	6.55e-05
316	2.43e-05	356	6.06e-05	396	6.81e-05
318	2.79e-05	358	5.38e-05	398	8.01e-05
				400	1.01e-04

Note: The intervals in Table II are in 2 nm. For 5 nm UV transmission data use the interpolated data between those ending in a "4" and a "6."

^a Sayre, R. M., et al., "Spectral Comparison of Solar Simulators and Sunlight," *Photodermatol Photoimmunol. Photomed.*, 7, 159-165 (1990).

$$UPF = \frac{\sum_{280}^{400} E_{\lambda} \times S_{\lambda} \times \Delta\lambda}{\sum_{280}^{400} E_{\lambda} \times S_{\lambda} \times T_{\lambda} \times \Delta\lambda} \quad (1)$$

where:

- E_{λ} = relative erythral spectral effectiveness (see Table I)
 S_{λ} = solar spectral irradiance (see Table II)
 T_{λ} = average spectral transmittance of the specimen (measured)
 $\Delta\lambda$ = measured wavelength interval (nm)

NOTE: Although integration is indicated from 280 nm to the stated wavelengths, little or no contribution will occur in the 280-290 nm region.

11.3 Calculate the average A-range ultraviolet (UV-A) transmittance using Equation 2:

$$T(UV-A)_{AV} = \frac{\sum_{315}^{400} T_{\lambda} \times \Delta\lambda}{\sum_{315}^{400} \Delta\lambda} \quad (2)$$

11.4 Calculate the average B-range ultraviolet (UV-B) transmittance using Equation 3:

$$T(UV-B)_{AV} = \frac{\sum_{280}^{315} T_{\lambda} \times \Delta\lambda}{\sum_{280}^{315} \Delta\lambda} \quad (3)$$

11.5 Calculate the percent blocking for UV-A and for UV-B using Equation 4 and Equation 5:

$$= 100\% - T(UV-A) \quad (4)$$

$$= 100\% - T(UV-B) \quad (5)$$

where:

$T(UV-A)$ or $T(UV-B)$ is expressed as a percentage.

12. Report

12.1 Report the following by sample identification:

12.1.1 The ultraviolet protection factor, UPF

12.1.2 The UV-A transmittance, $T(UV-A)$

12.1.3 The UV-B transmittance, $T(UV-B)$

12.1.4 The percent blocking (UV-A)

12.1.5 The percent blocking (UV-B)

12.1.6 The actual percent wet pick-up if other than 150%.

13. Precision and Bias

13.1 *Precision*. In March 1998, an ul-

traviolet transmittance scan was performed on the same specimen of 100% polyester woven fabric fifteen (15) times and the UPF calculated according to this procedure. The average UPF was 19.41 and the standard deviation was 0.18. *Between-laboratory* precision has not been established for this test method. Until such precision information is available, users of the method should use standard statistical techniques in making any comparison of test results for *between-laboratory* averages.

13.2 *Bias*. Transmittance or blocking of erythemally weighted ultraviolet radiation through fabrics can be defined only in terms of a test method. There is no independent method for determining the true value. As a means of estimating this property, the method has no known bias.

14. References

14.1 ASTM D 1776, Standard Practice for Conditioning and Testing Textiles (see 15.3).

14.2 ASTM E 179, Guide for Selection of Geometric Conditions for Measurement of Reflection and Transmission Properties of Materials (see 15.3).

14.3 ASTM E 275, Practice for Describing and Measuring Performance of Ultraviolet, Visible and Near-Infrared Spectrophotometers (see 15.3).

14.4 ASTM G 159, Standard Tables for References Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5: Direct Normal and Hemispherical for a 37° Tilted Surface (see 15.3).

14.5 ASTM E 1247, Test Method for Identifying Fluorescence in Object-Color Specimens by Spectrophotometry (see 15.3).

14.6 ASTM E 1348, Test Method for Transmittance and Color by Spectrophotometry using Hemispherical Geometry (see 15.3).

15. Notes

15.1 Spectrophotometers or spectroradiometers that meet the requirements of this test method are available from a large number of manufacturers.

15.2 Available from Schott Inc., 400 York Ave., Duryea PA 18642; tel: 717/457-4485.

15.3 Available from ASTM, 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken PA 19428-2959; tel: 610/832-9500; fax: 610/832-9555.

15.4 Commission International de L'Éclairage (CIE), Bureau Central de la CIE, Paris, France.

15.5 Available from AATCC, P.O. Box 12215, Research Triangle Park NC 27709; tel: 919/549-8141; fax: 919/549-8933; e-mail: orders@aatcc.org.

Appendix A

Spectrophotometer or Spectroradiometer Specifications

A1. The integrating sphere surface is internally coated or constructed using a material that is both diffuse and highly

reflecting in the ultraviolet region. The total surface area consumed by all port openings required shall not exceed 3% of the total surface area of the integrating sphere.

A2. Illumination and viewing geometries.

A2.1 Directional illumination/hemispherical collection (0/T). In this geometry the specimen is illuminated with an unidirectional beam whose axis is not greater than 0.14 rad (8°) from the surface normal of the sample. Any ray of this beam shall not exceed 0.09 rad (5°) from the beam axis. The cross-sectional area of the illuminating beam shall be at least 10 times the dimension of the largest hole in the test material. The total flux transmitted by the specimen is collected by the integrating sphere.

A2.2 Hemispherical illumination/directional viewing (T/0). In this geometry the specimen is illuminated by an internally illuminated integrating sphere. The specimen is viewed unidirectionally with an axis not greater than 0.14 rad (8°) from the surface normal of the sample. Any ray of this beam shall not exceed 0.09 rad (5°) from the beam axis.

The cross-sectional area of the viewing beam shall be at least 10 times the dimension of the largest hole in the test material.

A2.3 Sample substitution errors. Integrating spheres can experience "sample substitution" error due to contributions of the reflectance of the specimen on the internal illumination of the sphere. The error can be eliminated in either geometry by use of a separate reference beam that traverses its own port opening in the sphere. The reference beam impinges on either a portion of the sphere wall or a reference material mounted at a diametrically opposed port opening.

A3. Spectral requirements. The spectrophotometer or spectroradiometer shall have a spectral bandpass of 5 nm or less over the spectral range of 280 nm (or less) to 400 nm (or more). The measured wavelength interval over this spectral range should not be greater than 5 nm.

A4. Stray radiation. The contribution of stray radiation within the instrument, including that due to sample fluorescence, shall produce an error of less than 0.005 in the value of spectral transmittance being measured.

A5. Sample fluorescence. The contribution of sample fluorescence on spectral transmittance measurements on certain dyes and whitening agents present in fabrics that may fluoresce could result in artificially high values of spectral transmittance.

A5.1 Monochromatic illumination. In spectrophotometers where the monochromator precedes the specimen within the optical path, the artificially high val-

ues of transmittance appear at the excitation wavelengths of the fluorescing agent. This includes nearly all wavelengths in the UVR spectral region. The error due to the fluorescence can be removed by placing a UV transmitting, visible blocking filter after the sample. A Schott Glass UG11 filter has been found to be satisfactory. However, the decrease in transmission of the filter with increasing wavelength may reduce the usefulness of the long wavelength UVA

measurement.

A5.2 Polychromatic illumination. In spectrophotometers and spectroradiometers where the illumination is polychromatic and the monochromator follows the specimen in the optical path, the artificially high values of transmittance appear at the emission wavelengths of the fluorescing agent. The effects of fluorescence are, therefore, eliminated at most UVR wavelengths. The use of an illuminating light source

that conforms to the spectral distribution requirements for solar simulators will most accurately include the contribution of sample fluorescence to the long wavelength UVA measurement. However, because the fluorescent component does not contribute to the UPF, the spectral distribution of the source is irrelevant, so long as it provides sufficient energy to cover the spectral range of interest to acceptable signal to noise ratios in the spectral data.

ตารางแสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Anatase ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-021-1272

Pattern : 00-021-1272		Radiation = 1.540600		Quality : High		
TiO ₂		2 θ	I	h	k	l
Titanium Oxide Anatase, syn		25.281	100	1	0	1
		36.947	10	1	0	3
		37.801	20	0	0	4
		38.576	10	1	1	2
		48.050	35	2	0	0
		53.891	20	1	0	5
		55.062	20	2	1	1
		62.121	4	2	1	3
		62.690	14	2	0	4
		68.762	6	1	1	6
		70.311	6	2	2	0
		74.031	2	1	0	7
		75.032	10	2	1	5
		76.020	4	3	0	1
		80.727	2	0	0	8
		82.139	2	3	0	3
		82.662	6	2	2	4
		83.149	4	3	1	2
		93.221	2	2	1	7
		94.182	4	3	0	5
		95.143	4	3	2	1
		98.319	2	1	0	9
		99.804	2	2	0	8
		101.221	2	3	2	3
		107.448	4	3	1	6
		108.963	4	4	0	0
		112.841	2	3	0	7
		113.861	2	3	2	5
		114.909	2	4	1	1
		118.439	4	2	1	9
		120.104	2	2	2	8
		121.725	2	4	1	3
		122.336	2	4	0	4
		131.036	2	4	2	0
		135.998	2	3	2	7
		137.391	4	4	1	5
		143.888	2	3	0	9
		150.039	4	4	2	4
		152.634	2	0	0	12
Lattice : Body-centered tetragonal		Mol. weight = 79.90				
S.G. : I41/amd (141)		Volume [CD] = 136.31				
a = 3.78520	Z = 4	Dx = 3.893				
c = 9.51390		V _{cor} = 3.30				
Color: Colorless Sample source or locality: Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA. General comments: Anatase and another polymorph, brookite (orthorhombic), are converted to rutile (tetragonal) by heating above 700 C. General comments: Pattern reviewed by Holzer, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ, Fargo, North Dakota, USA, /CDD Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns. Additional pattern: Validated by calculated pattern. Temperature of data collection: Pattern taken at 25 C. Additional pattern: See ICSD 9852 (PDF 71-1166). Data collection flag: Ambient.						
Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 7, page 82 (1969)						
Radiation :	Filter : Not specified					
SS/FOM : F30-74(0.0116,35)	d-sp : Not given					

ตารางแสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Rutile ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-
International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-021-1276

Pattern : 00-021-1276		Radiation = 1.540600		Quality : High		
TiO ₂		2 θ	I	h	k	l
Titanium Oxide Rutile, syn Also called: titania		27.447	100	1	1	0
		36.086	50	1	0	1
		39.188	8	2	0	0
		41.226	25	1	1	1
		44.052	10	2	1	0
		54.323	60	2	1	1
		56.642	20	2	2	0
		62.742	10	0	0	2
		64.040	10	3	1	0
		65.480	2	2	2	1
		69.010	20	3	0	1
		69.790	12	1	1	2
		72.410	2	3	1	1
		74.411	1	3	2	0
		76.510	4	2	0	2
		79.822	2	2	1	2
		82.335	6	3	2	1
		84.260	4	4	0	0
		87.464	2	4	1	0
		89.557	8	2	2	2
		90.708	4	3	3	0
		96.275	6	4	1	1
		96.017	6	3	1	2
		97.177	4	4	2	0
		98.514	1	3	3	1
		105.099	2	4	2	1
		106.019	2	1	0	3
		109.406	2	1	1	3
		116.227	4	4	0	2
		117.527	4	5	1	0
		120.059	8	2	1	3
		122.788	8	4	3	1
		123.660	8	3	3	2
		131.847	6	4	2	2
		136.549	8	3	0	3
		140.052	12	5	2	1
		143.116	2	4	4	0
		155.870	2	5	3	0
<p>General comments: No impurity over 0.001%.</p> <p>Sample source or locality: Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA.</p> <p>General comments: Two other polymorphs, anatase (tetragonal) and brookite (orthorhombic), converted to rutile on heating above 700 C.</p> <p>Optical data: A=2.9467, B=2.6505, Sign=+</p> <p>General comments: Optical data on specimen from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 1 555.</p> <p>Reflectance: Opaque mineral optical data on specimen from Sweden: R_DR%=20.3, Disp.=Std.</p> <p>Vickers hardness number: VHN₁₀₀=1132-1187.</p> <p>General comments: Pattern reviewed by Syvinski, W., McCarthy, G., North Dakota State Univ, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-In-Aid (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns.</p> <p>General comments: Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed.</p> <p>Additional pattern: Validated by calculated pattern.</p> <p>General comments: Naturally occurring material may be reddish brown.</p> <p>Color: White</p> <p>Temperature of data collection: Pattern taken at 25 C.</p> <p>Data collection flag: Ambient.</p>		Mol. weight = 79.90				
Lattice : Tetragonal		Volume [CD] = 62.43				
S.G. : P42/mmm (136)		Dx = 4.250				
a = 4.59330		Dm = 4.230				
c = 2.95920		Wcor = 3.40				
Z = 2						
Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 7, page 83 (1969)						
Radiation : CuK α 1		Filter : Monochromator crystal				
Lambda : 1.54056		d-sp : Not given				
SS/FOM : F30=107(0.0088,32)		Internal standard : W				

ผลการทดสอบสมบัติต้านแบคทีเรีย

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติต้านแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* (*E. coli*)

ผลิตภัณฑ์	วิธีทดสอบ	<i>Escherichia coli</i>		
		CFU/ml		% Reduction
		0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
Blue colloid	ASTM E2149-10	$3.31 \times 10^6 \pm 3.35 \times 10^4$	0.00 ± 0.00	100
Yellow colloid	ASTM E2149-10	$4.11 \times 10^6 \pm 4.47 \times 10^5$	0.00 ± 0.00	100
Silk yarn	AATCC 100: 2004	$1.91 \times 10^6 \pm 1.64 \times 10^5$	$1.99 \times 10^7 \pm 6.44 \times 10^5$	- 932.93 *
Blue silk yarn	AATCC 100: 2004	$1.93 \times 10^6 \pm 1.46 \times 10^5$	0.00 ± 0.00	100
Yellow silk yarn	AATCC 100: 2004	$1.91 \times 10^6 \pm 1.64 \times 10^5$	0.00 ± 0.00	100

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติต้านแบคทีเรียชนิด *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*)

ผลิตภัณฑ์	วิธีทดสอบ	<i>Staphylococcus aureus</i>		
		CFU/ml		% Reduction
		0 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	
Blue colloid	ASTM E2149-10	$1.19 \times 10^6 \pm 9.24 \times 10^4$	0.00 ± 0.00	100
Yellow colloid	ASTM E2149-10	$1.19 \times 10^6 \pm 9.24 \times 10^4$	0.00 ± 0.00	100
Silk yarn	AATCC 100: 2004	$2.62 \times 10^6 \pm 1.78 \times 10^5$	$9.56 \times 10^6 \pm 1.39 \times 10^4$	- 265.35 *
Blue silk yarn	AATCC 100: 2004	$2.67 \times 10^6 \pm 1.30 \times 10^5$	$1.17 \times 10^2 \pm 1.15 \times 10^1$	99.99
Yellow silk yarn	AATCC 100: 2004	$2.70 \times 10^6 \pm 1.31 \times 10^5$	$4.27 \times 10^2 \pm 3.06 \times 10^1$	99.98
Green colloid	ASTM E2149-10	$9.42 \times 10^6 \pm 6.93 \times 10^5$	$6.97 \times 10^1 \pm 5.77 \times 10^0$	100
Green silk yarn	AATCC 100: 2004	$9.33 \times 10^6 \pm 1.50 \times 10^5$	$1.13 \times 10^2 \pm 5.77 \times 10^0$	99.99
AgPCA silk yarn	AATCC 100: 2004	$1.71 \times 10^6 \pm 2.95 \times 10^5$	$4.67 \times 10^2 \pm 5.69 \times 10^1$	99.97
AgTPCA silk yarn	AATCC 100: 2004	$1.65 \times 10^6 \pm 2.16 \times 10^5$	$8.00 \times 10^1 \pm 1.73 \times 10^1$	99.99

หมายเหตุ * เครื่องหมายลบ = จำนวนแบคทีเรียหลังการทดสอบมากกว่าแบคทีเรียก่อนทดสอบ

Blue colloid = ซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน

Yellow colloid = ซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลือง

Green colloid = ซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียวที่ได้จากการผสมระหว่างซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงินและเหลือง

Silk yarn = เส้นด้ายไหมที่ไม่ผ่านการเคลือบ

Blue silk yarn = เส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีน้ำเงิน

Yellow silk yarn = เส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีเหลือง

Green silk yarn = เส้นด้ายไหมที่ย้อมด้วยซิลเวอร์คอลลอยด์สีเขียว

AgPCA silk yarn = เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์และสารยึดติดพอลิอะคริลิก

AgTPCA silk yarn = เส้นด้ายไหมที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ไททานเนียม/สารยึดติดพอลิอะคริลิก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนิกานต์ มุรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	28 กันยายน พ.ศ.2537
สถานที่เกิด	จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
วุฒิการศึกษา	วท.บ วัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	5/87 เอกบดินทร์คอนโด ซอยลาดพร้าว 17 ถนนลาดพร้าว แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ผลงานตีพิมพ์	Moonrat, C., Kittinaovarut, S., Jinawath, S., Sujaridworakun, P.(2020). "The Effect of pH Values on Color Development of Silver Colloids." Key Engineering Materials 862: 17-21. Moonrat, C., Kittinaovarut, S., Jinawath, S., Sujaridworakun, P.(2020). "The Effect of pH Values of Silver Colloids on Coloration of Silk Yarn." PPC & PETROMAT SYMPOSIUM 2020: 487-492. (e-Proceedings) และนำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในการประชุม The 26th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 11th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2020) แบบออนไลน์ผ่านโปรแกรม Zoom Meeting เมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม 2563