

การพัฒนาผ้าที่มีสมบัติป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SHIELDING FABRIC



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การพัฒนาผ้าที่มีสมบัติป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า |
| โดย | นายสิริภพ ถาวร |
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีภูถักกิจ |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

| | |
|-------------------------------------------------|---------------------------------|
| | คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ |
| (ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช) | |
| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | ประธานกรรมการ |
| | |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจฉรงค์) | |
| | อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีภูถักกิจ) | |
| | กรรมการ |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์) | |
| | กรรมการ |
| (อาจารย์ ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์) | |
| | กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์) | |

สิรภพ ถาวร : การพัฒนาผ้าที่มีสมบัติป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า. (DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SHIELDING FABRIC) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของพอลิอะนิลีนที่เคลือบลงบนชั้นสเตรตสองชนิดอันได้แก่ ผ้าเอมอะรามิดและผ้าเอมอะรามิดที่ถูกดัดแปรผ่านปฏิกิริยาไนเตรชัน/รีดักชัน โดยใช้ความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์ที่ 1% ถึง 20% โดยปริมาตร อีกทั้งศึกษาผลของการซักและการโดบที่ภาวะต่างๆ แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ คือการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ความแข็งกระด้างเมื่อตัดโค้ง และความคงทนของสีต่อการซัก

จากผลการทดลองได้ภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ผ้าที่มีสมบัติป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าคือการเคลือบพอลิอะนิลีน ที่ความเข้มข้นอะนิลีนมอนอเมอร์ 10% ลงบนผ้าเอมอะรามิดที่ไม่ได้ดัดแปร ให้ค่าความต้านทานที่ผิวอยู่ที่ 0.034 กิโลโอห์มต่อตาราง คิดเป็นประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ที่ 20.99 เดซิเบล ภายหลังจากการซักและการโดบซ้ำ ประสิทธิภาพปิดกั้นมีแนวโน้มลดลงในทุกกรณี ในกรณีที่เคลือบที่ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร ความแข็งกระด้างตัดโค้งมีค่า 204.60 มิลลิกรัมเซนติเมตร การเปื้อนติดภายหลังจากซักอยู่ที่ระดับ 5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

| | | |
|----------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประ ยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ | ลายมือชื่อนิสิต |
| ปี | 2561 | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก |
| การศึกษา | | |

6072188923 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE
TECHNOLOGY

KEYWORD: EMI SHIELDING/NOMEX/POLYANILINE/TEXTILES

Sirapob Tavon : DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE
SHIELDING FABRIC. Advisor: Assoc. Prof. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D.

This research was to study the electromagnetic shielding effectiveness from surface resistivity measurement of polyaniline that was coated onto two substrates: m-aramid and modified m-aramid using nitration/reduction reaction. The different concentrations of aniline monomer were applied ranging from 1% v/v to 20% v/v. The coated fabrics were subjected to wash and re-dope. Then, surface resistivity, flexural rigidity and color fastness of washing were evaluated.

Results showed that the 10% v/v PANi coated aramid fabrics exhibited the highest electromagnetic interference shielding (SE) of which surface resistance of $0.034 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ was found, corresponding to electromagnetic interference shielding efficiency of 20.99 dB. After washing and re-doping, SE tended to decrease in all cases. In case of 10 % v/v coating, flexural rigidity was 204.60 mg*cm, and color fastness to wash in staining was grade 5, indicating the stiffness property and good wash fastness, respectively.

| | | |
|-------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
| Field of Study: | Applied Polymer Science and Textile Technology | Student's Signature |
| Academic Year: | 2018 | Advisor's Signature |

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีภูถกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา และช่วยเหลืองานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อัจฉรงค์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์ ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะพร ความภีรภาพันท์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งเพื่อมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขข้อมูลในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ คุณอดิศักดิ์ ถือพลอย สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนทุกท่านอันเป็นที่รักยิ่ง ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนเสมอมา จนงานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

สิริภพ ถาวร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....ค | |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง | |
| กิตติกรรมประกาศ.....จ | |
| สารบัญ.....ฉ | |
| สารบัญรูป.....ณ | |
| สารบัญตาราง.....ฎ | |
| บทที่ 1 บทนำ..... 1 | |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... 1 | |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... 2 | |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2 | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3 | |
| 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและปัญหาการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... 3 | |
| 2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... 3 | |
| 2.1.2 ความเข้ากันได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... 4 | |
| 2.1.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า..... 5 | |
| 2.2 พอลิอะนิลีนและการสังเคราะห์..... 5 | |
| 2.2.1 พอลิอะนิลีน..... 5 | |
| 2.2.2 การสังเคราะห์พอลิอะนิลีน..... 7 | |
| 2.3 ฟ้าเอ็มอะรามิตและกระบวนการผลิต..... 8 | |
| 2.3.1 เส้นใยอะรามิต..... 8 | |
| 2.3.2 กระบวนการผลิตเส้นใยอะรามิต..... 10 | |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 13 |
| บทที่ 3 การทดลอง..... | 16 |
| 3.1 วัสดุและสารเคมี | 16 |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ | 16 |
| 3.3 การเตรียมผ้าเอ็มอะรามิด | 17 |
| 3.3.1 การตัดแปรรูปผ้า | 17 |
| 3.3.2 การเตรียมสารละลายอะนิลีนและสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต... .. | 18 |
| 3.3.3 การต่อกิ่งพอลิอะนิลีนลงบนผ้าเอ็มอะรามิด | 19 |
| 3.4 การทดสอบชิ้นงาน..... | 21 |
| 3.4.1 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 21 |
| 3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี | 21 |
| 3.4.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและคำนวณประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า | 22 |
| 3.4.4 การวัดความแข็งกระด้างดัดโค้งของชิ้นงาน..... | 23 |
| 3.4.5 การวัดความคงทนของสีต่อการซักของชิ้นงาน..... | 25 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล | 29 |
| 4.1 ผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ... | 29 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี..... | 33 |
| 4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและคำนวณประสิทธิภาพการปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า | 35 |
| 4.4 ผลการวัดความแข็งกระด้างดัดโค้งของชิ้นงาน..... | 40 |
| 4.5 ผลการวัดความคงทนของสีต่อการซักของชิ้นงาน | 41 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 47 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 47 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย | 48 |
| บรรณานุกรม..... | 49 |
| ภาคผนวก..... | 51 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 68 |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและตัวอย่างแหล่งกำเนิดคลื่น | 3 |
| รูปที่ 2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่างๆ | 6 |
| รูปที่ 2.3 พอลิอะนิลีนในโครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ ที่แปรเปลี่ยนไปตามปฏิกิริยารีดอกซ์ | 7 |
| รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของอะรามิด | 8 |
| รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเมตาอะรามิด (poly (m-phenylene isophthalamide)) | 10 |
| รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Nomex..... | 11 |
| รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของพาราอะรามิด (poly (p-phenylene terephthalamide)) | 12 |
| รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Kevlar | 12 |
| รูปที่ 3.1 การเกิดปฏิกิริยาไนเตรชันรีดักชัน และการตอกกิ่งด้วยพอลิอะนิลีนของผ้าเอ็มอะรามิด | 18 |
| รูปที่ 3.2 พูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ | 21 |
| รูปที่ 3.3 มัลติมิเตอร์และการใช้หัววัดชิ้นงานแบบ 4 จุด | 23 |
| รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความแข็งกระด้างของผ้า (Stiffness Tester) | 24 |
| รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอินฟราเรด..... | 25 |
| รูปที่ 3.6 ตู้แสงมาตรฐาน | 27 |
| รูปที่ 3.7 แถบสีเทาสำหรับการเปลี่ยนสีและแถบสีเทาสำหรับการเป็อนสี..... | 27 |
| รูปที่ 3.8 เครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer)..... | 28 |
| รูปที่ 4.1 รูป SEM ของผ้าเอ็มอะรามิดที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 29 |
| รูปที่ 4.2 รูป SEM ของผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปรที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)... | 29 |
| รูปที่ 4.3 รูป SEM ของผ้าเอ็มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 5% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 30 |
| รูปที่ 4.4 รูป SEM ของผ้าเอ็มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 10% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 30 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.5 รูป SEM ของผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 15% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 30 |
| รูปที่ 4.6 รูป SEM ของผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 20% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 31 |
| รูปที่ 4.7 รูป SEM ของผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 5% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 31 |
| รูปที่ 4.8 รูป SEM ของผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 10% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 31 |
| รูปที่ 4.9 รูป SEM ของผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 15% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 32 |
| รูปที่ 4.10 รูป SEM ของผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 20% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b) | 32 |
| รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของผ้าเอี๋มอะรามิดและผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปร | 34 |
| รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน และผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน | 34 |
| รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของผ้าเอี๋มอะรามิด ผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน และผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการโดป | 35 |
| รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซัก และผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซักแล้วโดป | 35 |
| รูปที่ 4.15 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน | 36 |
| รูปที่ 4.16 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน | 36 |
| รูปที่ 4.17 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการโดป | 36 |
| รูปที่ 4.18 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการโดป | 37 |
| รูปที่ 4.19 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซัก | 37 |
| รูปที่ 4.20 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซัก | 37 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| รูปที่ 4.21 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอมอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซักแล้วโดย | 38 |
| รูปที่ 4.22 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอมอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซักแล้วโดย | 38 |
| รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งกระด้างเมื่อตัดโค้งของพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด และพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปร | 41 |
| รูปที่ 4.24 ค่าความต่างสีของผ้าประกบแผ่นที่ 1 (เอมอะรามิด) สำหรับการทดสอบการซักของพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด | 42 |
| รูปที่ 4.25 ค่าความต่างสีของผ้าประกบแผ่นที่ 1 (เอมอะรามิด) สำหรับการทดสอบการซักของพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปร | 43 |
| รูปที่ 4.26 ค่าความต่างสีของผ้าประกบแผ่นที่ 2 (ฝ้าย) สำหรับการทดสอบการซักของพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด | 43 |
| รูปที่ 4.27 ค่าความต่างสีของผ้าประกบแผ่นที่ 2 (ฝ้าย) สำหรับการทดสอบการซักของพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปร | 44 |
| รูปที่ 4.28 ค่าความเข้มสี (K/S) ก่อนและหลังทดสอบการซักของ พอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด | 45 |
| รูปที่ 4.29 ค่าความเข้มสี (K/S) ก่อนและหลังทดสอบการซักของ พอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปร | 45 |
| รูปที่ 4.30 ค่าความต่างสี (Δa^* และ Δb^*) ของพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด | 45 |
| รูปที่ 4.31 ค่าความต่างสี (Δa^* และ Δb^*) ของพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปร | 46 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางที่ 2.1 ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าแต่ละชนิด | 6 |
| ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยอะรามิด..... | 9 |
| ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีของเส้นใยอะรามิด | 10 |
| ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย | 16 |
| ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมสารละลายอะนินที่มีความเข้มข้นต่างๆ..... | 19 |
| ตารางที่ 3.3 ค่าความต่างสีในระบบ CIELAB เทียบกับระดับการเปลี่ยนแปลงสีจากแถบสีเทา . | 26 |
| ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นงานที่ภาวะต่างๆ..... | 40 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันที่วิทยาการได้ก้าวหน้าไปไกลนั้น การใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็มีเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสาร การทหาร หรือการแพทย์ โดยอุปกรณ์เหล่านี้มีหน้าที่ส่งและรับสัญญาณที่ส่งออกมาในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วนำไปประมวลผลต่อ ซึ่งการส่งออกมาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น อาจทำให้เกิดการรบกวนระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยกันเอง หรืออาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ดังนั้นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference: EMI) จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะหาวิธีป้องกันหรือลดทอนให้น้อยลงไป

พอลิอะนิลีน (Polyaniline) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ เนื่องด้วยความเป็นผลึกที่สูง อีกทั้งโครงสร้างที่แนวสายโซ่หลักประกอบไปด้วยพันธะคู่สลับเดี่ยว หรือพันธะคู่แบบคอนจูเกตที่ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านพันธะเดี่ยวและวิ่งไปเรื่อยๆตลอดพันธะคู่แบบคอนจูเกตนี้ นำผลมาซึ่งการนำไฟฟ้าได้ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนผ่านมากกระทบจะเคลื่อนที่ไปตลอดโครงสร้างพอลิอะนิลีน ทำให้พอลิอะนิลีนสามารถป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตามพอลิอะนิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปเป็นวัสดุได้ยากหรือทำไม่ได้เลย ดังนั้นเพื่อสามารถนำพอลิอะนิลีนไปใช้ประโยชน์จึงสามารถทำได้โดยการเคลือบ หรือเตรียมในรูปพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการเคลือบพอลิอะนิลีนลงบนผ้าเอมอะรามิด

ผ้าเอมอะรามิด หรือที่มีชื่อทางการค้าโดยทั่วไปคือ NOMEX เป็นเส้นใยในกลุ่มพอลิเอไมด์ มีโครงสร้างแบบเมตา มีผลึกสูงและมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดอื่นเนื่องจากสายโซ่หลักประกอบไปด้วยวงแหวนเบนซีน จึงนิยมนำไปใช้งานกับสิ่งทอที่ต้องการสมบัติพิเศษเช่น การทนไฟ การทนการขีดถูสูง เป็นต้น

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะผลิตผ้าที่มีความสามารถในการป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเลือกผ้าเอมอะรามิดเนื่องจากมีความทนทานต่อปฏิกิริยาเคมีสูง โดยจะทำการต่อกิ่งพอลิอะนิลีนลงบนผ้าเอมอะรามิด โดยขอขอบเขตงานวิจัยนี้เริ่มต้นโดยการดัดแปรพื้นผิวของผ้าผ่านปฏิกิริยาไนเตรชัน (Nitration) ตามด้วยปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) เพื่อเติมหมู่เอมีนลงบนพื้นผิวผ้า จากนั้นทำการกราฟต์พอลิอะนิลีนลงบนผิวผ้าด้วยสารละลายอะนิลีนที่ความเข้มข้น 1%

ถึง 20% ด้วยตัวริเริ่มปฏิริยาอันได้แก่ แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ 0 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิริยาออกซิเดชัน พอลิเมอไรเซชัน จะเกิดการคายความร้อนขึ้น จากนั้นโดยตัวกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 10% จากนั้นคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference shielding effectiveness: EMI SE) โดยคำนวณผ่านการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของชิ้นงาน (Surface resistance)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมผ้าเอมอะรามิดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยพอลิอะนิลีน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าที่เตรียมได้ดังกล่าว

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

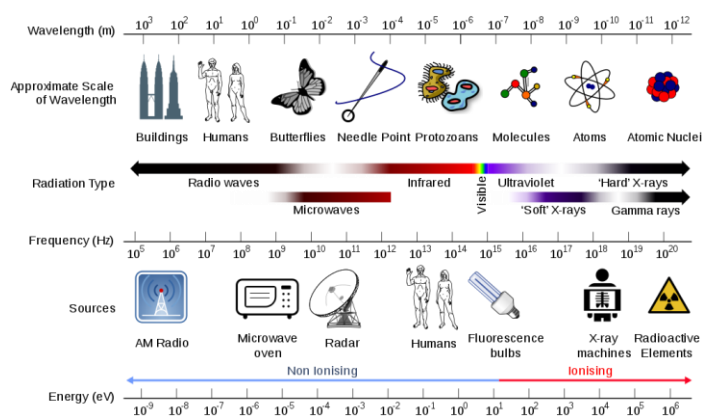
ได้ผ้าเอมอะรามิดที่มีประสิทธิภาพปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและปัญหาการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [1] หมายถึง คลื่นที่แสดงลักษณะการผันแปรของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โดยคลื่นนี้จะเป็นตัวกลางในการส่งผ่านพลังงานที่มีให้อยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในปี ค.ศ. 1873 เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ ได้ค้นพบว่า เมื่อมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นโดยแปรตามเวลาในอวกาศที่ว่างนั้นแล้ว สนามแม่เหล็กที่แปรตามเวลานั้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งแปรตามเวลา และเมื่อสนามไฟฟ้าแปรตามเวลาได้เกิดขึ้นก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กแปรตามเวลาเช่นนี้เรื่อยไป การเกิดขึ้นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้านี้เรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดในทุกทิศทาง และในปี ค.ศ. 1887 รูดอล์ฟ ไฮน์ริช เอิร์ตซ์ ได้สร้างเครื่องรับส่งสัญญาณวิทยุเพื่อพิสูจน์การมีอยู่จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งนอกจากคลื่นวิทยุที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วนั้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังมีอีกหลายชนิดซึ่งนิยมแบ่งประเภทตามย่านของความถี่คลื่น โดยสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ยาวมากๆ เช่น คลื่นวิทยุแบบเอเอ็มที่มีความยาวคลื่นขนาดประมาณ 10^3 เมตร ไปจนถึงรังสีแกมมาที่มีความยาวคลื่นขนาดประมาณ 10^{-12} เมตร และนอกเหนือจากนี้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายรูปแบบเช่น คลื่นอัลตราซาวด์หรือคลื่นเสียงความถี่สูง คลื่นโทรทัศน์ คลื่นสัญญาณโทรศัพท์มือถือ คลื่นไมโครเวฟ คลื่นเรดาร์ รังสีเอกซ์ เป็นต้นดังแสดงในรูปที่ 2.1 นี้



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและตัวอย่างแหล่งกำเนิดคลื่น

อย่างไรก็ตามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีสมบัติโดยคร่าวๆดังนี้คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นต่างจากคลื่นชนิดอื่นโดยส่วนใหญ่ที่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น คลื่นเสียงที่ผ่านอากาศเป็นตัวกลาง แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในสุญญากาศโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาตัวกลางในการเคลื่อนที่แต่อย่างใด และการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถส่งผ่านพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดได้ โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเคลื่อนที่ในอวกาศว่างหรือสุญญากาศ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความเร็วอยู่ที่ 3×10^8 เมตรต่อวินาที นอกเหนือจากนี้ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดลงหรือแปรเปลี่ยนไปตามตัวกลางที่คลื่นได้เคลื่อนที่ผ่านไป นอกจากนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังสามารถสะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนได้

2.1.2 ความเข้ากันได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในอดีตช่วงประมาณปี ค.ศ. 1800 การพัฒนาระบบสายไฟฟ้าและระบบสัญญาณโทรศัพท์ในแถบยุโรปได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มีรายงานว่าการวางสายไฟฟ้ากับสายโทรศัพท์ที่ไปบนเสาไฟฟ้าเดียวกันนั้นก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอันเกิดมาจาก ความเข้ากันได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility, EMC) [2] และต่อมาในปี ค.ศ. 1901 กุลกลีเอลโม มาร์โคนี ได้ประดิษฐ์เครื่องส่งสัญญาณวิทยุจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน 2 แหล่ง ส่งสัญญาณไปยังสถานีปลายทางในเวลาเดียวกัน เขาพบว่า ที่สถานีปลายทางนั้นไม่สามารถรับสัญญาณใดๆ ได้เลย เนื่องจากสัญญาณวิทยุทั้งสองนั้นเกิดการรบกวนกันเอง แต่ในช่วงนั้นปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ายังเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อย เพราะความหนาแน่นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีค่อนข้างต่ำ ปล่อยคลื่นที่มีความถี่ต่ำ จากนั้นปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นที่สนใจมากขึ้นด้วยการเกิดขึ้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความจุสูงเช่น โทรานซิสเตอร์ที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1950 และการเปลี่ยนผ่านจากยุคที่ใช้การประมวลผลแบบอะนาล็อกมาเป็นแบบดิจิทัลในช่วงประมาณปี ค.ศ. 1970 และในปี ค.ศ. 1979 สหรัฐอเมริกาได้เล็งเห็นว่าปัญหาความเข้ากันได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นปัญหาที่สำคัญต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จึงได้ตั้งกรรมาธิการขึ้นเพื่อกำหนดมาตรฐานและขีดจำกัดในการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเอาไว้ โดยข้อกำหนดนั้นคือ Federal Communications Commissions (FCC) เป็นข้อกำหนดที่บังคับใช้กับอุปกรณ์สื่อสาร แบ่งออกเป็นสามประเภทใหญ่ๆคือ อุปกรณ์ความถี่วิทยุ อุปกรณ์อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ การแพทย์ และอุปกรณ์ระบบโทรศัพท์ โดยสาเหตุที่ต้องกำหนด

มาตรฐานให้กับอุปกรณ์เหล่านี้เพราะต้องการที่จะจำกัดสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะปล่อยออกไปรบกวนอุปกรณ์อื่นๆที่อยู่ใกล้เคียง

2.1.3 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

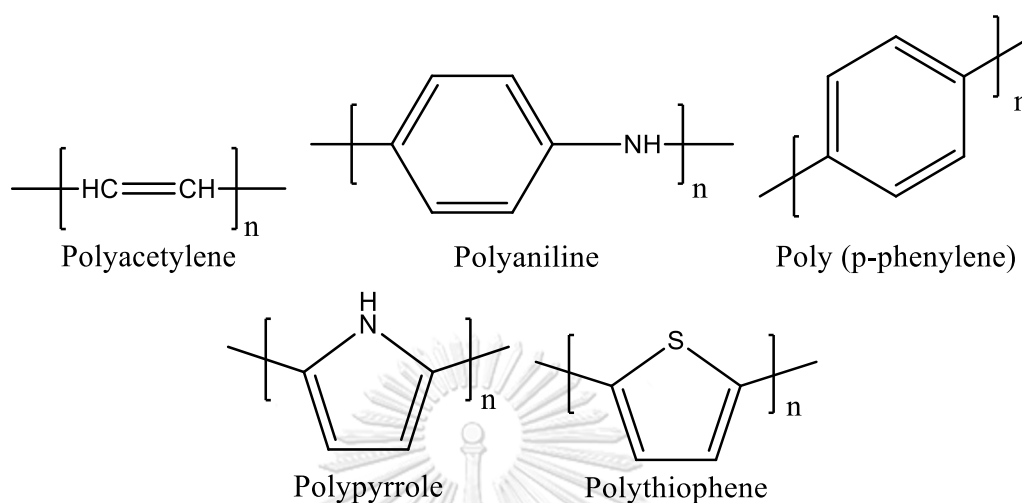
สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI) เป็นสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [3] ซึ่งการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นในหลายช่วงความถี่ [4] เช่น ในช่วงความถี่ต่ำตั้งแต่ประมาณ 0 Hz – 2000 Hz นั้นมักเรียกว่า ฮาร์โมนิก ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนออกจากสัญญาณไซน์ อาจส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้มีอายุการใช้งานที่สั้นลง ส่วนการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 150 kHz – 1 GHz มักจะเรียกแทนว่าการรบกวนความถี่วิทยุ โดยปัญหาจากสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายรายงานด้วยกันเช่น การรบกวนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดพกพาที่ส่งผลต่อการควบคุมและบังคับการบินอันเนื่องมาจากช่วงคลื่นความถี่ที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นใช้มีความใกล้เคียงกับความถี่ที่เครื่องบินใช้งาน การรบกวนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับอุปกรณ์ทางการแพทย์ในโรงพยาบาล [5] ที่มักจะเห็นประกาศงดใช้โทรศัพท์มือถือในบางส่วนของโรงพยาบาล และการมีความเชื่อว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อาจจะมีผลต่อสุขภาพของผู้ใช้งานในระยะยาว การลดทอนหรือควบคุมปัญหาที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทำได้โดยมีหลักคิดดังนี้คือ การกำจัดแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน การตัดเส้นทาง การเชื่อมต่อ และการเพิ่มภูมิคุ้มกันให้กับตัวรับผ่านการสะท้อน (มักพบในวัสดุที่เป็นโลหะ) และการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (มักพบในพอลิเมอร์นำไฟฟ้า) ซึ่งสามสิ่งนี้ก็กล่าวมานี้สามารถกระทำได้อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือกระทำพร้อมกันทั้งหมดก็ได้

2.2 พอลิอะนิลีนและการสังเคราะห์

2.2.1 พอลิอะนิลีน

พอลิอะนิลีน [6] เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ด้วยสาเหตุที่ว่าพอลิอะนิลีนสามารถเตรียมได้โดยง่าย มีราคาที่ถูก มีความเสถียรต่อสภาพบรรยากาศค่อนข้างดี เหตุที่พอลิอะนิลีนและพอลิเมอร์อีกหลายชนิดสามารถนำไฟฟ้าได้เนื่องจากมีการที่มีระบบไพคอนจูเกตในโครงสร้าง กล่าวคือมีการมีพันธะคู่สลับเดียวจากการต่อกันของคาร์บอนอะตอม ประกอบกับการมีวงแหวนอะโรมาติกและการมีอะตอมของไนโตรเจนอยู่ใน

โครงสร้างที่สามารถกระจายอิเล็กตรอนได้ดี นอกจากพอลิอะนิลีนแล้วยังมีพอลิเมอร์ที่สามารถนำไฟฟ้าได้อีกหลายชนิดแสดงดังรูปที่ 2.2 และแสดงค่าสภาพนำไฟฟ้าดังตารางที่ 2.1 นี้

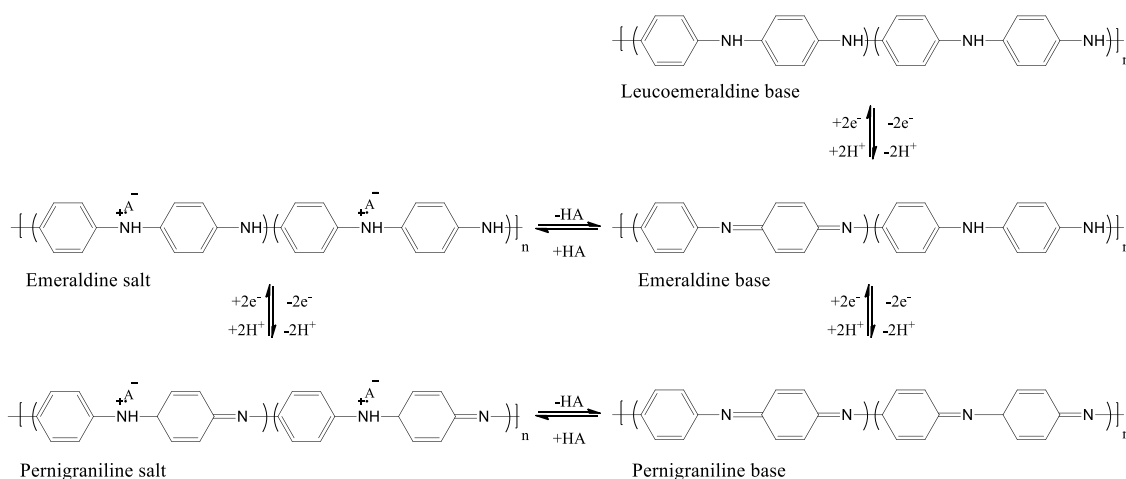


รูปที่ 2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิอะเซทิลีน พอลิอะนิลีน พอลิพาราฟินิลีน พอลิไพร์โรล และพอลิไทโอฟีน ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าแต่ละชนิด [7]

| พอลิเมอร์ | ชนิดสารโด๊ป | สภาพนำไฟฟ้า (s/cm) |
|---------------|-----------------------------|------------------------|
| Polyacetylene | I_2, Br_2Li, Na, AsF_5 | 10^4 |
| Polyaniline | HCl | 200 |
| Polyphenylene | AsF_5, Li, K | 10^3 |
| Polypyrrole | BF_4^-, ClO_4^- | $500 - 7.5 \cdot 10^3$ |
| Polythiophene | $BF_4^-, ClO_4^-, FeCl_4^-$ | 10^3 |

พอลิอะนิลีนมีลักษณะเด่นที่แตกต่างจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดอื่นๆคือ พอลิอะนิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ตามค่าพีเอชที่เปลี่ยนไป ซึ่งอาจกระทำได้โดยการโด๊ป แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างไปมาได้หลายโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างทั้งหลายรูปแบบของพอลิอะนิลีนนั้น มีเพียงโครงสร้างเดียวที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีคือ โครงสร้างแบบ Emeraldine salt [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นี้



รูปที่ 2.3 พอลิอะนิลีนในโครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ ที่แปรเปลี่ยนไปตามปฏิกิริยารีดอกซ์

2.2.2 การสังเคราะห์พอลิอะนิลีน

การสังเคราะห์พอลิอะนิลีนได้มาจากการรวมของอะนิลีนมอนอเมอร์หลายหน่วยเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์พอลิอะนิลีนมีหลายวิธีที่สำคัญดังนี้

การสังเคราะห์ทางเคมี เป็นการสังเคราะห์ที่เตรียมได้โดยง่ายและสะดวก กล่าวคือ นิยมใช้ในทางการค้าโดยทั่วไป เตรียมได้โดยนำสารออกซิแดนท์ที่แรงเช่นแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และใช้กรดเป็นตัวละลายอะนิลีน เช่น กรดซัลฟิวริก โดยอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 0 องศาเซลเซียส

การสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า เป็นการสังเคราะห์ที่ให้พอลิอะนิลีนที่มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง เหมาะกับงานทางด้านเคมีวิเคราะห์ แต่อุปกรณ์ในการเตรียมค่อนข้างยุ่งยาก คือต้องมีการเตรียมขั้วไฟฟ้าหลายชนิด การสังเคราะห์จะเกิดขึ้นเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1 โวลต์ในสารละลายมอนอเมอร์แล้ว มอนอเมอร์ก็จะถูกออกซิไดซ์และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันขึ้นเป็นพอลิอะนิลีนได้

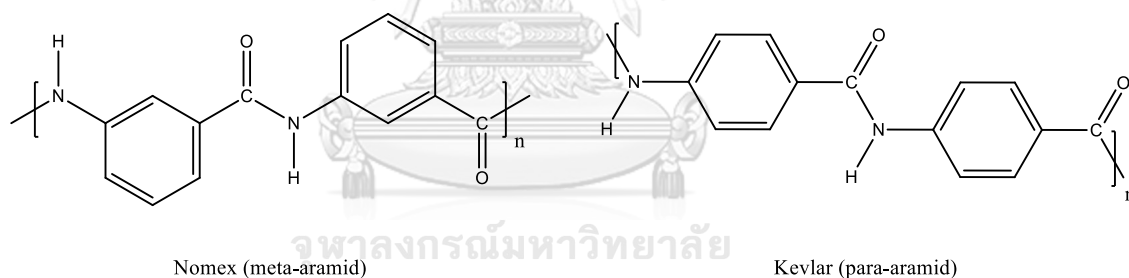
การสังเคราะห์โดยใช้แสง เป็นการสังเคราะห์ที่มีความเป็นพิษน้อยเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ทางเคมี สามารถเตรียมได้โดยการฉายแสงลงบนฟิล์มที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของรูทีเนียมกับเมทิลไวโอเจน โดยให้ฟิล์มนี้ติดอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าและจุ่มลงในสารละลายมอนอเมอร์ จะได้

สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถริเริ่มให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้

2.3 ผ้าเอมอะรามิดและกระบวนการผลิต

2.3.1 เส้นใยอะรามิด

อะรามิด (Aramid) [9] เป็นคำย่อมาจากภาษาอังกฤษคือ Aromatic polyamide คือเป็นเส้นใยพอลิเอไมด์ที่มีวงแหวนอะโรมาติกอยู่ภายในโครงสร้าง แตกต่างจากเส้นใยไนลอนที่เป็นเพียง polyamide เท่านั้น โดยเส้นใยอะรามิดนี้จะต้องมีพันธะเอไมด์อย่างน้อย 85% ของทั้งหมด เกาะด้วยวงแหวนอะโรมาติกทั้งสองข้าง เส้นใยอะรามิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ Nomex (meta-aramid) และ Kevlar (para-aramid) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นี้ ทั้งสองนี้เป็นชื่อทางการค้าที่ถูกตั้งชื่อโดยบริษัทดูปองท์ โดย Nomex มักนำไปใช้ในงานที่ต้องการทนอุณหภูมิที่สูงหรือการใช้ในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการทนไฟ เช่นผ้าม่าน ชุดนอน ชุดผจญเพลิง ส่วน Kevlar มักใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงเป็นหลักเช่นสายพานลำเลียง เสื้อเกราะกันกระสุน เส้นใยใช้ในการเสริมแรง เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของอะรามิด

อย่างไรก็ตาม สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเส้นใยอะรามิดมีหลายประการ [10] แสดงตามตารางที่ 2.2 และ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยอะรามิด

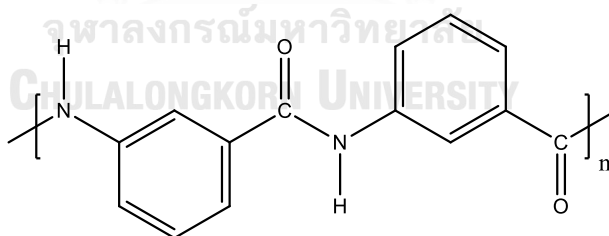
| สมบัติทางกายภาพ | รายละเอียด |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ลักษณะภายนอก | มีภาคตัดขวางเป็นวงกลมคล้ายไนลอน และส่วนมากเป็นเส้นใยาว มีสีค่อนข้างขาวและมีความมันหลายระดับ |
| ความแข็งแรง | มีความแข็งแรงดีมาก ดีกว่าเส้นใยประดิษฐ์อื่นๆไม่ว่าจะเป็นไนลอน เรยอนชนิดความแข็งแรงสูง หรือพอลิเอสเตอร์ ความแข็งแรงอาจสูงถึง 21.5 กรัมเปอร์ดิเนียร์ (gpd) เมื่อนำมาเป็นผ้าฝืนจะมีลักษณะที่ทนทานต่อการสึกหรอแม้ใช้งานไปนาน ทนต่อการฉีกขาดและการขูดถู |
| สภาพยืดหยุ่น | ค่อนข้างสูง |
| การคืนตัวจากแรงอัด | ดี รักษารูปทรงได้ดี แม้ความกระด้างของเส้นใยอาจมีบ้าง แต่ก็ยังเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นเครื่องนุ่งห่มได้ เช่น ชุดดับเพลิง |
| ความสามารถในการดูดซับความชื้น | ต่ำ และแห้งค่อนข้างเร็วเมื่อเปียกน้ำ |
| การนำความร้อน | ทนความร้อนได้สูง อุณหภูมิของเตารีดไม่มีผลต่อเส้นใย และตัวเส้นใยเองมีสมบัติในการนำความร้อนที่ไม่ดี |
| การติดไฟ | ไม่ติดไฟและไม่เกิดการหลอมหยด หากแต่เมื่อถึงอุณหภูมิประมาณ 370 องศาเซลเซียส เส้นใยอาจเกิดการเสื่อมสภาพหรือหดตัว การเผาเป็นเถ้าถ่านจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงมาก และเมื่อเอาเปลวไฟออกจากเส้นใย ไฟจะไม่ลามและดับได้ด้วยตัวของมันเอง |
| ความถ่วงจำเพาะ | ประมาณ 1.4 |

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีของเส้นใยอะรามิด

| สมบัติทางเคมี | รายละเอียด |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| การทนต่อกรด | ไม่ทนกรดแก่ |
| การทนต่อด่าง | ทนต่อด่างได้ดีที่อุณหภูมิห้อง แต่เสื่อมสภาพเมื่อถูกด่างแก่ที่อุณหภูมิสูง |
| การทนต่อสารซักฟอก | ทนต่อสารซักฟอกโดยทั่วไปเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมคลอไรท์ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ |
| การทนต่อสารละลายอินทรีย์ | ทนต่อสารละลายอินทรีย์โดยทั่วไปเช่นคาร์บอนเตตระคลอไรด์ และทนต่อเหงื่อ |
| การทนต่อแสงแดด | ไม่มีผลต่อการใช้งาน การเสื่อมสภาพอาจเกิดขึ้นเมื่อถูกแสงแดดเป็นเวลานานมาก |
| การรับสีย้อม | ย้อมติดได้เฉพาะสีเบสิกเท่านั้น มักย้อมในลักษณะการเติมเม็ดสีในเนื้อเส้นใยในขั้นตอนการผลิต |

2.3.2 กระบวนการผลิตเส้นใยอะรามิด

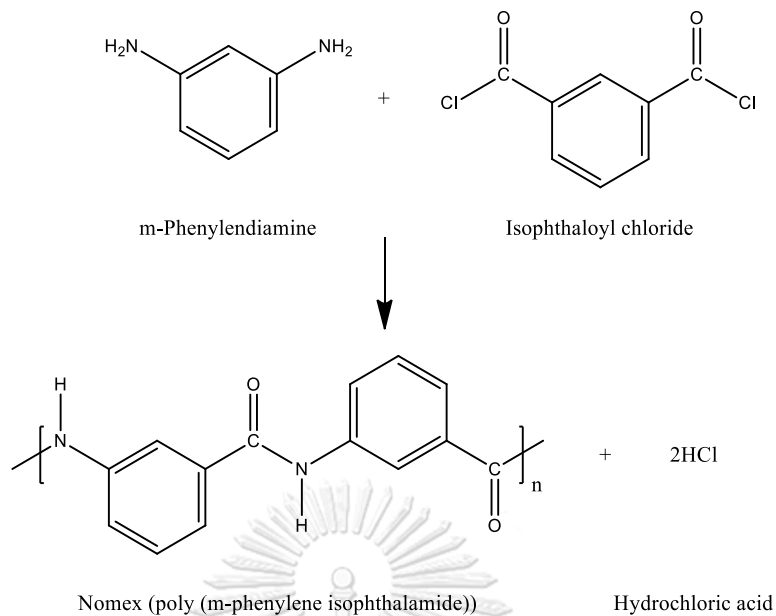
เส้นใยเมตาอะรามิด (เอ็มอะรามิด) หรือ Nomex คือ Poly (m-phenylene isophthalamide, MPIA) ที่มีหน่วยซ้ำดังรูปที่ 2.5



Nomex (meta-aramid)

รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเมตาอะรามิด (poly (m-phenylene isophthalamide))

สามารถผลิตได้โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่าง aromatic diamines กับ aromatic diacid chlorides โดยหลักสำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงก็คือการทำปฏิกิริยาแบบ solution polymerization ที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 นี้

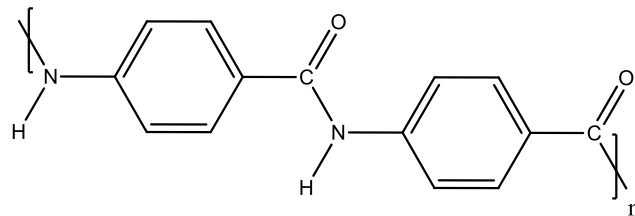


รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Nomex

ภายหลังบริษัทดูปองท์ก็ได้พัฒนากระบวนการผลิตเส้นใยขึ้นโดยใช้การปั่นเส้นใยแบบแห้งโดยใช้สารละลาย 19% MPIA, 70% DMA, 9% CaCl₂ และน้ำ จากนั้นปั่นแล้วล้างเส้นใยด้วยน้ำจนสารละลายต่างๆอันได้แก่ DMA และ CaCl₂ เหลือประมาณ 60% และ 15% ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักเส้นใยที่เปียกให้มีค่าประมาณ 1 ถึง 1.5 เท่าของน้ำหนักเส้นใยที่แห้ง จากนั้น กระบวนการล้างและดัดยัดในขั้นตอนถัดมาให้กระทำไปพร้อมกัน กำหนดอัตราการดัดยัดประมาณ 4 ต่อ 1 ในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ทำเช่นนี้จนกระทั่งปริมาณของ DMA และ CaCl₂ เหลืออยู่ที่ประมาณ 0.5% และ 0.1% ตามลำดับ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการตกแต่งสำเร็จและตกผลึกที่อุณหภูมิประมาณ 165 องศาเซลเซียส

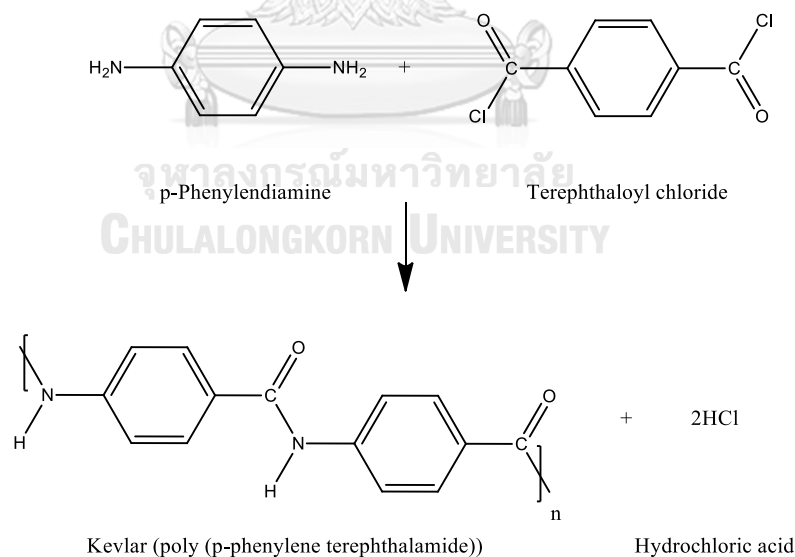
นอกจากการผลิตเส้นใย Nomex โดยบริษัทดูปองท์แล้ว ยังมีบริษัทอื่นที่ผลิตเส้นใยเมตาอะรามิดเช่นกันก็คือบริษัทเทยีน ผลิตโดยใช้ชื่อทางการค้าคือ Conex หรือ Teijinconex ซึ่งวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก็ใช้ MPIA เช่นกัน แต่พบในท้องตลาดแค่ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น โดยเส้นใย Nomex มีการผลิตออกมาหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะหรือวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ตั้งแต่เส้นใยที่มีความยาวที่สั้นมากๆ (fibrid) เส้นใยสั้น (staple) และเส้นใยยาว (filament)

เส้นใยพาราอะรามิด (พีอะรามิด) หรือ Kevlar คือ Poly (p-phenylene terephthalamide, PPTA) มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างไปจาก Nomex ดังแสดงหน่วยซ้ำในรูปที่ 2.7 นี้



Kevlar (para-aramid)

รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของพาราอะรามิด (poly (p-phenylene terephthalamide)) เส้นใย Kevlar นี้ถูกค้นพบโดยบริษัทดูปองท์ประมาณปี ค.ศ. 1970 โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่าง Terephthaloyl chloride (TPC) กับ p-Phenylene diamine (PDA) โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Kevlar

บริษัทดูปองท์ได้ผลิต Kevlar ออกมาหลายประเภทด้วยกันซึ่งแตกต่างกันในขั้นตอนของการตัดแปรรายหลังจากการปั่นออกมาเป็นเส้นใยแล้วเช่น Kevlar49 จะผ่านการดัดแบบร้อน ส่วน Kevlar29 จะไม่ได้ผ่านการดัดแบบร้อน เป็นต้น และนอกจากบริษัทดูปองท์แล้ว ยังมีบริษัท

อื่นที่ผลิตเส้นใยพาราอะรามิดเช่นกัน โดยในปี ค.ศ.1985 กลุ่มเอกโซจากการร่วมทุนของเยอรมันกับฮอลแลนด์ได้ผลิตเส้นใยที่ใช้ชื่อทางการค้าว่า Twaron และบริษัทเทยีนของญี่ปุ่นก็ได้ผลิตเส้นใยที่ใช้ชื่อทางการค้าว่า HM-50 ซึ่งเส้นใยชนิดนี้เปลี่ยนวัตถุดิบตั้งต้นจาก p-Phenylene diamine (PDA) กับ Terephthaloyl chloride (TPC) เป็น p-Phenylene diamine (PDA), Terephthalic acid และ 3,4-diaminodiphenyl ether แทน ทำให้โครงสร้างมีการปรับตัวได้มากขึ้น และอย่างไรก็ตามเส้นใย Kevlar มักเน้นใช้งานเพื่ออุตสาหกรรม ผลิตออกมาในรูปแบบเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว และนิยมใช้เป็นส่วนประกอบในการเสริมแรงของชิ้นงาน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hoghoghifard และคณะ [11] ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพปิดกั้นการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI shielding) และศึกษาผลของการโด๊ป โดยการเตรียมการเคลือบพอลิอะนิลีนลงบนซับสเตรตอันได้แก่ผ้าทอพอลิเอสเตอร์ โดยขั้นตอนการเตรียมพอลิอะนิลีนนั้นได้ใช้ความเข้มข้นของอะนิลีนคือ 2% โดยปริมาตร และใช้แอมโมเนียม เปอร์ออกซีไดซัลเฟตเป็นออกซิแดนท์หรือตัวริเริ่มปฏิกิริยา กำหนดอัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อออกซิแดนท์คือ 1:1 โดยโมล ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นโด๊ปด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อัตราส่วนของไฮโดรคลอริกต่อมอนอเมอร์ที่ 3,7 และ 9 โดยโมล แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นทำการโด๊ปซ้ำด้วยไอของไฮโดรคลอริกเข้มข้น, ไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และ Toluene 4-sulfonic acid ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จากนั้นวัดค่าความต้านทานแล้วนำมาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการทดลองที่ได้พบว่า การโด๊ปที่ได้ผลดีที่สุดหรือเมื่อวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวต่ำที่สุดคือการโด๊ปด้วยไฮโดรคลอริกที่อัตราส่วน 7 เท่าโดยโมลต่อมอนอเมอร์ และการโด๊ปซ้ำที่ได้ผลดีที่สุดคือการใช้ไอของไฮโดรคลอริกเข้มข้น ผลของกระบวนการทั้งสองที่กระทำภายหลังการเคลือบพอลิอะนิลีนให้ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวอยู่ที่ 467 โอห์มต่อตาราง การชักขึ้นงานทำให้ค่าความต้านทานที่ผิวมีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการโด๊ปโดยใช้ไฮโดรคลอริก ค่าความต้านทานที่ผิวมีค่าลดลง และเมื่อนำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมาคำนวณประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่คลื่น 10 กิกะเฮิรตซ์แล้วพบว่าค่าประมาณ 1.2-2.6 เดซิเบล ซึ่งเทียบได้กับการลดทอนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าประมาณ 43% - 53% ส่วนการทดสอบของชิ้นงานนั้นในการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักไม่ได้ประเมินความคงทนของสีที่เปลี่ยนแปลงไป แต่

ประเมินความคงทนของสีที่เปื้อนติด ให้ผลการทดสอบอยู่ในระดับดีเยี่ยม (ระดับ 5) ส่วนการทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถูนั้นอยู่ในระดับที่พอใช้ (ระดับ 2-3)

Ztempien และคณะ [12] ได้ศึกษาการเคลือบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสองชนิดอันได้แก่พอลิอะนิลีน และพอลิไพร์โรล ลงบนซับสเตรตที่เป็นผ้าทอหลายชนิดด้วยกันคือ พอลิอะคริไลไนไตรล์, ฝ้าย, ขนสัตว์, พอลิเอสเตอร์, ฝ้ายผสมระหว่างฝ้ายกับพอลิเอสเตอร์ และฝ้ายผสมระหว่างฝ้ายกับขนสัตว์ ส่วนการเคลือบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าลงบนผิวผ้านั้นใช้วิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท กล่าวคือมีหัวพิมพ์แยกออกเป็นสองหัว หัวพิมพ์แรกต่อกับส่วนบรรจุของสารละลายมอนอเมอร์ ส่วนอีกหัวพิมพ์จะบรรจุสารละลายออกซิแดนซ์ สำหรับพอลิอะนิลีนจะใช้อะนิลีนมอนอเมอร์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 โมลาร์จนถึง 1.2 โมลาร์ ใช้แอมโมเนียม เปอร์ออกไซด์ซัลเฟตเป็นออกซิแดนซ์หรือตัวริเริ่มปฏิกิริยา กำหนดอัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อออกซิแดนซ์คือ 1:1.2 โดยโมล ส่วนพอลิไพร์โรลจะใช้ความเข้มข้นของไพร์โรลมอนอเมอร์ตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.9 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อออกซิแดนซ์คือ 1:1 โดยโมล กำหนดเวลาในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาหาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวโดยใช้หัววัดแบบ 4 จุด โดยคำนวณจากการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ พบว่าที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์เท่ากัน ผ้าที่เคลือบด้วยพอลิอะนิลีนให้ค่าความต้านทานที่ผิวต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบในพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันแต่ต่างซับสเตรตพบว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆ นั้น การมีพอลิอะคริไลไนไตรล์จะให้ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวต่ำที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจนถึง 1.0 โมลาร์ของอะนิลีนมอนอเมอร์แล้วพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของซับสเตรตที่ต่างกันไม่ได้มีค่าที่แตกต่างกันมากนัก ภาวะที่เหมาะสมคือความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์ที่ 1.0 โมลาร์โดยมีพอลิอะคริไลไนไตรล์เป็นซับสเตรต ให้ค่าความต้านทานที่ผิวประมาณ 100 โอห์มต่อตารางหรือคิดเป็นค่าประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าประมาณ 11.1 เดซิเบล

Muthukumar และคณะ [13] ศึกษาประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการเคลือบพอลิอะนิลีนลงบนผ้าถักผสมของไนลอน/ไลครา ใช้ความเข้มข้นของอะนิลีนที่ 0.5 โมลาร์ และใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็นแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โดยกำหนดอัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อตัวริเริ่มอยู่ที่ 1:1.25 ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 1 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิไว้ประมาณ 5 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมีค่าประมาณ 3.5 กิโลโอห์มต่อตาราง และการวัดค่าประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 8-12 กิกะเฮิรตซ์มีค่าประมาณ 26 เดซิเบล ส่วนการวัดค่าความต้านทานที่ผิวเมื่อแปรความชื้นหรืออุณหภูมิ

นั่น ค่าความต้านทานที่ผิวมีค่าลดลงแต่ไม่มากนักเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (จาก 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส) และมีค่าลดลงแต่ไม่มากนักเช่นกันเมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (จาก 40% ถึง 90%) จึงสามารถตัดปัจจัยทั้งสองออกไปจากการพิจารณาได้



บทที่ 3 การทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. ผ้าเอมอะรามิด หรือในชื่อทางการค้าคือ NOMEX โดยมีน้ำหนักต่อพื้นที่ประมาณ 165 กรัมต่อตารางเมตร

2. กรดไนตริกเข้มข้น 69% จาก Lobachemie, India
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% จาก Ajax finechem, Australia
4. โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ จาก Kemuas, Australia
5. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จาก Mallinckrodt, USA
6. กรดไฮโดรคลอริก 37% จาก QReC, New Zealand
7. อะนิลีน 99% จาก Applichem, Germany
8. แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต จาก QReC, New Zealand

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

| เครื่องมือ/อุปกรณ์ | รุ่น/บริษัทผู้ผลิต |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Multimeter) | 2700/Keithley Instruments, Inc. |
| เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอินฟราเรด (Infrared Moisture Determination Balance) | AD-4725/AND Co., Ltd. |
| เครื่องวัดความแข็งกระด้างของผ้า (Stiffness Tester) | M003B/SDL Atlas Co., Ltd. |
| เครื่องทดสอบการซัก Launder-o-meter (Gyrowash) | James H. Heal & Co., Ltd. England |
| ตู้แสงมาตรฐาน (Color Assessment Cabinet) | Verivide CAC 60/Leslie Hubble Limited |

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

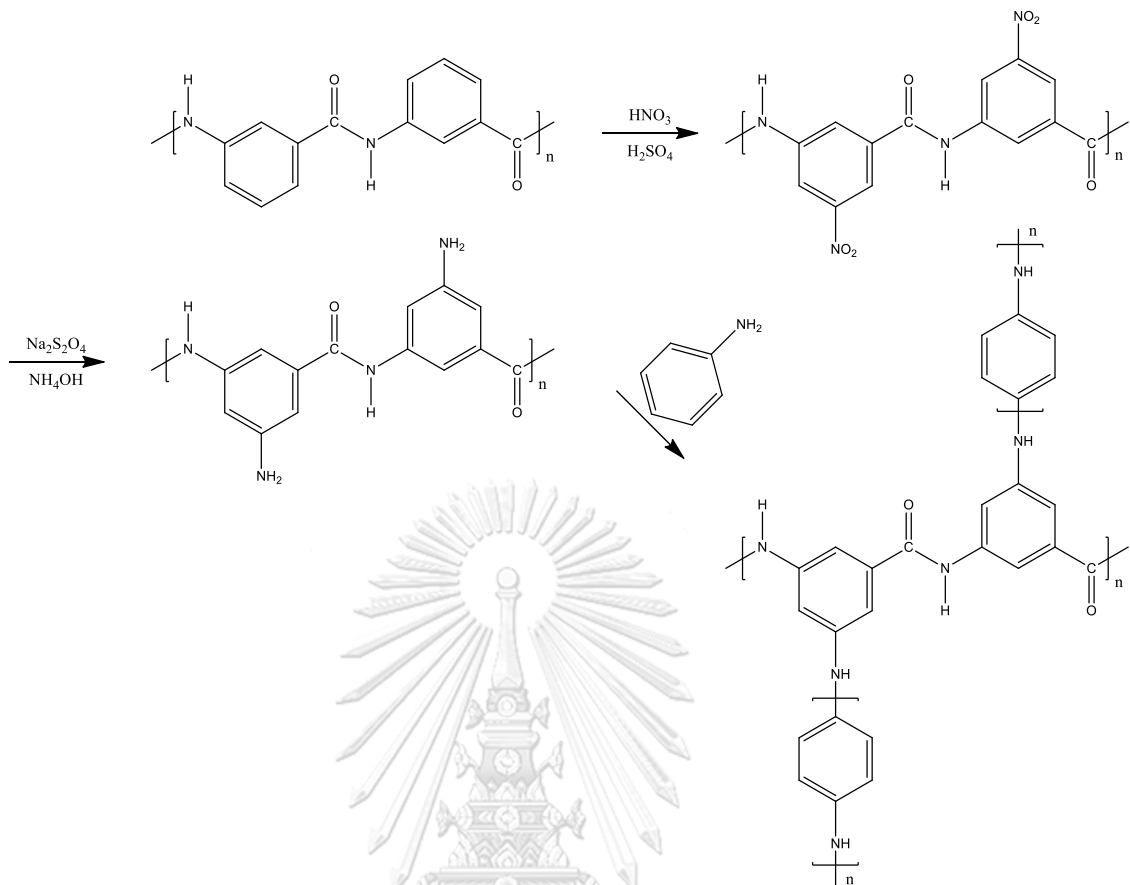
| เครื่องมือ/อุปกรณ์ | รุ่น/บริษัทผู้ผลิต |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| แถบสีเทาวัดระดับการเปลี่ยนแปลงสีและการเปื้อนสีผ้า (Grey Scale for Color Change and Color Stain) | James H. Heal & Co., Ltd. England |
| เครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer) | Macbeth color-eye 7000/X-rite, Incorporated United States |

3.3 การเตรียมผ้าเอมอะรามิด

3.3.1 การตัดแปรพื้นผิวผ้า

ตัดผ้าเอมอะรามิดขนาด 5*20 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น และทำการตัดแปรพื้นผิวผ้าด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

เตรียมสารละลายสำหรับทำปฏิกิริยาไนเตรชัน/รีดักชัน โดยผสมกรดไนตริกเข้มข้นกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อัตราส่วน 1:1 ซึ่งปฏิกิริยานี้ให้กระทำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสโดยประมาณ ผ่านการเตรียมอ่างหล่อเย็น แล้วนำผ้าเอมอะรามิดลงแช่เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่าพีเอชเป็นกลาง ตามด้วยการแช่ผ้าลงในสารละลายไฮโดรซัลไฟต์ 10 กรัม/ลิตร กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิลิตร/ลิตร เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นให้ล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชมีค่าเป็นกลางแล้วผึ่งให้แห้งก่อนเข้าสู่กระบวนการต่อไป ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองที่กล่าวมานี้ กำหนดให้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุ (liquor ratio) ที่ 1:50 กล่าวคือ น้ำหนักของผ้า 1 กรัม ให้ใช้ปริมาณของเหลวหรือสารละลายที่ 50 มิลลิลิตร ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาไนเตรชัน/รีดักชัน [14] แสดงได้ด้วยรูปที่ 3.1 นี้



รูปที่ 3.1 การเกิดปฏิกิริยาไนเตรชัน/รีดักชัน และการต่อกิ่งด้วยพอลิอะนิลีนของผ้าเอ็มอะรามิด

[15]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 การเตรียมสารละลายอะนิลีนและสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต

ในการทดลองนี้ได้กำหนดสัดส่วนโดยโมลของสารเคมีแต่ละชนิดคือ อัตราส่วนของอะนิลีนต่อซัลฟิวริกคือ 1:1.5 โดยโมล และอัตราส่วนของแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตต่ออะนิลีนคือ 1:1.25 และแปรความเข้มข้นของอะนิลีนตั้งแต่ 1% ถึง 20% โดยมีสูตรการเตรียมดังตารางที่ 3.2 นี้

ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมสารละลายอะนินที่ความเข้มข้นต่างๆ

| ความเข้มข้นของ อะนิน (%) | อะนิน (กรัม) (ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร) | ซัลฟิวริกเข้มข้น (กรัม) (ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร) | แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (กรัม) (ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร) |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1 | 1.0 | 1.58 | 2.94 |
| 2.5 | 2.5 | 3.95 | 7.36 |
| 5 | 5.0 | 7.90 | 14.72 |
| 7.5 | 7.5 | 11.85 | 22.08 |
| 10 | 10.0 | 15.80 | 29.44 |
| 12.5 | 12.5 | 19.75 | 36.80 |
| 15 | 15.0 | 23.70 | 44.16 |
| 17.5 | 17.5 | 27.65 | 51.52 |
| 20 | 20.0 | 31.60 | 58.88 |

3.3.3 การตอกึงพอลิอะนินลงบนผ้าเอ็มอะรามิด

ผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปรจะถูกตอกึงพอลิอะนิน อีกทั้งผ่านการโดปและชักขึ้นงานที่ภาวะต่างๆกันดังนี้

3.3.3.1 การย้อมพอลิอะนินบนผ้าเอ็มอะรามิด

ผสมสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.2 อันประกอบไปด้วยสารละลายอะนินและสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (ออกซิแดนท์) กวนเข้าด้วยกันอย่างรวดเร็ว จากนั้นเทลงในภาชนะบรรจุผ้าเอ็มอะรามิดขนาด 5*20 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วผึ่งให้แห้ง เตรียมทั้งหมด 9 ความเข้มข้นตั้งแต่ 1% ถึง 20%

3.3.3.2 การต่อกิ่งพอลิอะนิลีนบนผ้าเอมอะรามิดดัดแปร

เตรียมชิ้นงานเหมือนข้อ 3.3.3.1 แต่เปลี่ยนขั้วสเตรตเป็นผ้าเอมอะรามิดดัดแปรผ่านฏิกิริยาไนเตรชัน/รีดักชันดังที่กล่าวไปแล้วในข้อ 3.3.1

3.3.3.3 การโอบพอลิอะนิลีนบนผ้า

เตรียมชิ้นงานเหมือนข้อ 3.3.3.1 จากนั้นให้นำไปแช่ในสารละลายไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชเป็นกลาง แล้วผึ่งให้แห้ง

3.3.3.4 การโอบพอลิอะนิลีนบนผ้าเอมอะรามิดดัดแปร

เตรียมชิ้นงานเหมือนข้อ 3.3.3.2 จากนั้นให้นำไปแช่ในสารละลายไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชเป็นกลาง แล้วผึ่งให้แห้ง

3.3.3.5 การเตรียมผ้าเอมอะรามิดเคลือบด้วยพอลิอะนิลีนแล้วผ่านการซัก

เตรียมชิ้นงานเหมือนข้อ 3.3.3.1 จากนั้นให้นำไปซักด้วยเครื่องทดสอบการซัก Gyrowash โดยใช้สารซักล้างคือ standard soap ที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุที่ 1:50 ซักที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วผึ่งให้แห้ง

3.3.3.6 การเตรียมผ้าเอมอะรามิดดัดแปรและเคลือบด้วยพอลิอะนิลีนแล้วผ่านการซัก

เตรียมเหมือนข้อ 3.3.3.5 แต่เปลี่ยนขั้วสเตรตเป็นผ้าเอมอะรามิดที่ถูกดัดแปรแทน

3.3.3.7 การเตรียมผ้าเอมอะรามิดเคลือบด้วยพอลิอะนิลีนแล้วผ่านการซักและโอบ

เตรียมชิ้นงานเหมือนข้อ 3.3.3.5 จากนั้นให้นำไปแช่ในสารละลายไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชเป็นกลาง แล้วผึ่งให้แห้ง

3.3.3.8 การเตรียมผ้าเอมอะรามิดดัดแปร เคลือบด้วยพอลิอะนิลีนแล้วผ่านการซักและโอบ

เตรียมเหมือนข้อ 3.3.3.7 แต่เปลี่ยนขั้วสเตรตเป็นผ้าเอมอะรามิดที่ถูกดัดแปรแทน

3.4 การทดสอบชิ้นงาน

3.4.1 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เตรียมผ้าเอี๋มอะรามิดเปล่า ผ้าเอี๋มอะรามิดที่ถูกดัดแปร ผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน และผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ให้มีขนาดประมาณ 5*5 มิลลิเมตร ที่ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% จากนั้นนำเข้าตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15.0 กิโลโวลต์ และกำลังขยายที่ 1500 เท่าและ 4000 เท่า

3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เตรียมผ้าเอี๋มอะรามิดเปล่า ผ้าเอี๋มอะรามิดที่ถูกดัดแปร ผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน และผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ให้มีขนาดประมาณ 5*5 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้น 20% จากนั้นตรวจหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) โดยใช้หัวกดแบบสัมผัสกับชิ้นตัวอย่าง และมีช่วงการสแกนที่เลขคลื่นตั้งแต่ 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1}



รูปที่ 3.2 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

3.4.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและคำนวณประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เตรียมชิ้นงานจากภาวะต่างๆที่ได้ในข้อ 3.3.3 มาตัดให้มีขนาด 3*3 เซนติเมตร จากนั้นนำมาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของชิ้นงาน (Surface resistance, R_s) ตามมาตรฐาน AATCC test method 76-2011 [16] โดยใช้มัลติมิเตอร์ประกอบเข้ากับชุดหัววัดแบบ 4 หัววัด นำค่าความต้านทานที่อ่านได้ในหน่วยโอห์ม นำมาคำนวณเป็นค่าความต้านทานที่ผิวในหน่วยโอห์มต่อตาราง (ohms per square) ดังสมการที่ 3.1 นี้

$$R = O \times \frac{W}{D} \dots \dots \dots (3.1)$$

โดยที่

R = ความต้านทานที่ผิวในหน่วยโอห์มต่อตาราง

O = ความต้านทานที่ได้จากการวัดในหน่วยโอห์ม

W = ความกว้างระหว่างอิเล็กโทรด

D = ระยะห่างของแต่ละอิเล็กโทรด

จากนั้นนำค่าความต้านทานที่ผิวที่คำนวณได้มาคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness: EMI SE) ในหน่วยเดซิเบล (dB) สำหรับความถี่ของคลื่นที่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) ดังสมการที่ 3.2 นี้ [11]

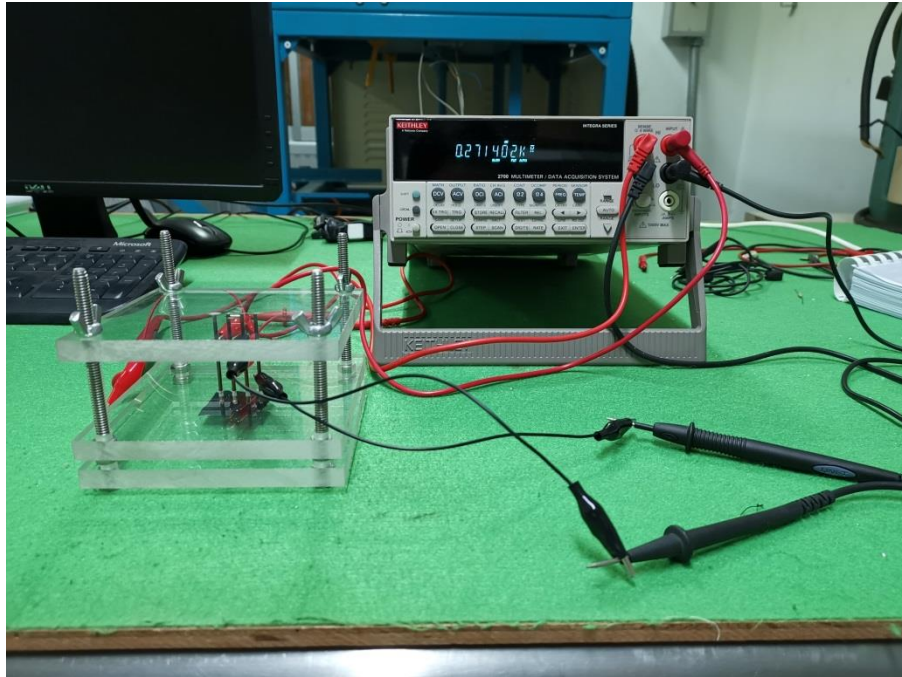
$$SE(dB) = 20 \log \left(1 + \frac{(0.976)Z_0}{2R_s^{0.820}} \right) \dots \dots \dots (3.2)$$

โดยที่

SE = ประสิทธิภาพปิดกั้นในหน่วยเดซิเบล

Z_0 = อิมพีแดนซ์ในบรรยากาศ (impedance of free space) มีค่า 377 โอห์ม

R_s = ความต้านทานที่ผิวในหน่วยโอห์มต่อตาราง



รูปที่ 3.3 มัลติมิเตอร์และการใช้หัววัดชิ้นงานแบบ 4 จุด

3.4.4 การวัดความแข็งกระด้างดัดโค้งของชิ้นงาน

นำชิ้นงานไปนำหน้ากดพื้นที่ตามมาตรฐาน ASTM D3776-09 [17] โดยตัดชิ้นงานให้มีพื้นที่ 100 ตารางเซนติเมตร จากนั้นควบคุมอุณหภูมิที่ 21 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 65% แล้วนำไปตั้ง ค่าที่ได้จะเป็นหน่วยกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นหาค่าความแข็งกระด้างเมื่อดัดโค้ง (Flexural rigidity) เพื่ออธิบายความกระด้างของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D1388-96 [18] โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาด 25*200 มิลลิเมตร วางลงบนแท่นวางตัวอย่างของเครื่องทดสอบความแข็งกระด้างของผ้า จากนั้นให้ทับด้วยแถบวัดระยะโค้งงอของตัวอย่าง เลื่อนแถบวัดระยะด้วยความเร็วคงที่ประมาณ 120 มิลลิเมตรต่อนาที จนขอบผ้าแตะแถบอ้างอิงที่ทำมุม 41.5 องศา กับระนาบเครื่องวัด อ่านค่าที่ได้ในหน่วยเซนติเมตร คำนวณหาความแข็งกระด้างเมื่อดัดโค้งดังสมการที่ 3.3 นี้

$$G = \frac{W}{10} \times C^3 \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

โดยที่

G = ความแข็งกระด้างเมื่อดัดโค้ง (flexural rigidity) ในหน่วยมิลลิกรัมเซนติเมตร

W = น้ำหนักของผ้าในหน่วยกรัมต่อตารางเซนติเมตร

C = ระยะดัดโค้งในหน่วยเซนติเมตร



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความแข็งกระด้างของผ้า (Stiffness Tester)



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอินฟราเรด

3.4.5 การวัดความคงทนของสีต่อการซักของชิ้นงาน

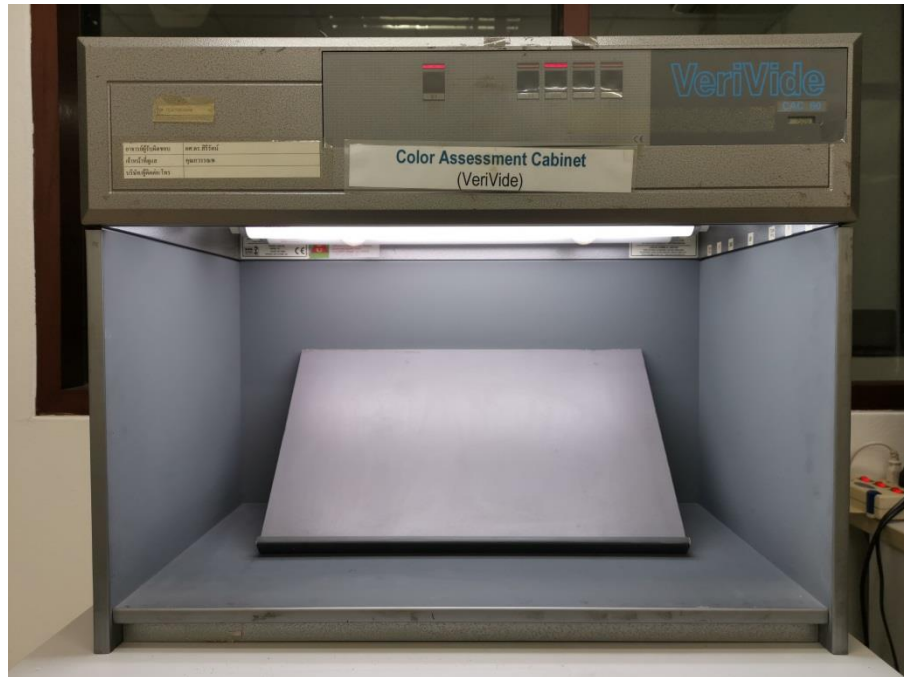
ทดสอบการซักของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 105-C01 [19] โดยนำชิ้นงานเย็บประกบกับผ้าอีกสองด้าน โดยด้านหนึ่งเป็นผ้าเอมอะรามิดเปล่า ส่วนอีกด้านเป็นผ้าฝ้ายหรือขนสัตว์ จากนั้นให้ซักในเครื่องทดสอบการซัก Gyrowash โดยใช้สารซักล้างคือ standard soap ที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วผึ่งให้แห้ง นำผ้าทั้งสามผืนประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีโดยใช้แถบสีเทาเป็นตัวเทียบในตู้แสงมาตรฐาน ใช้แหล่งแสง D65 สังเกตด้วยตาที่ทำมุมตั้งฉากกับชิ้นงาน สำหรับผ้าที่ถูกตอกด้วยพอลิอะนิลีน ให้ใช้แถบสีเทาสำหรับการเปลี่ยนสี (Grey scale for color change) ส่วนผ้าเย็บประกบอีกทั้งสองผืน อันได้แก่เอมอะรามิดและฝ้ายหรือขนสัตว์ ให้ใช้แถบสีเทาสำหรับการเปลี่ยนสี (Grey scale for color change) โดยการวัดให้นำผ้าที่ไม่ผ่านการซักกับผ่านการซักวางเทียบกันแล้วสังเกตการ

เปลี่ยนแปลงของสีเทียบกับแถบสีเทาซึ่งมี 5 ระดับ โดยระดับ 5 สีไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป สังเกตด้วยตาไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนระดับ 1 สีมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

การวัดค่าสีอาจใช้เครื่องวัดสี (Reflectance spectrophotometer) ได้ โดยใช้ภาวะในการวัดแบบไม่รวมความมันเงา (Specular exclude, SPE) เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ 6500 เคลวิน วัดค่าสีในระบบ CIELAB อ่านค่าความต่างสี (ΔE) แล้วเปรียบเทียบกับระดับการเปลี่ยนแปลงสีจากแถบสีเทาดังตารางที่ 3.3 นี้

ตารางที่ 3.3 ค่าความต่างสีในระบบ CIELAB เทียบกับระดับการเปลี่ยนแปลงสีจากแถบสีเทา [20]

| ระดับการเปลี่ยนแปลงสี จากแถบสีเทา | ค่าความต่างสีในระบบ CIELAB | ค่าความคลาดเคลื่อนตาม มาตรฐาน CIELAB unit |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| 5 | 0.0 | ±0.2 |
| 4-5 | 0.8 | ±0.2 |
| 4 | 1.7 | ±0.3 |
| 3-4 | 2.5 | ±0.3 |
| 3 | 3.4 | ±0.4 |
| 2-3 | 4.8 | ±0.5 |
| 2 | 6.8 | ±0.6 |
| 1-2 | 9.6 | ±0.7 |
| 1 | 13.6 | ±1.0 |



รูปที่ 3.6 ตู้แสงมาตรฐาน



รูปที่ 3.7 แถบสีเทาสำหรับการเปลี่ยนสีและแถบสีเทาสำหรับการเปลี่ยนสี



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer)

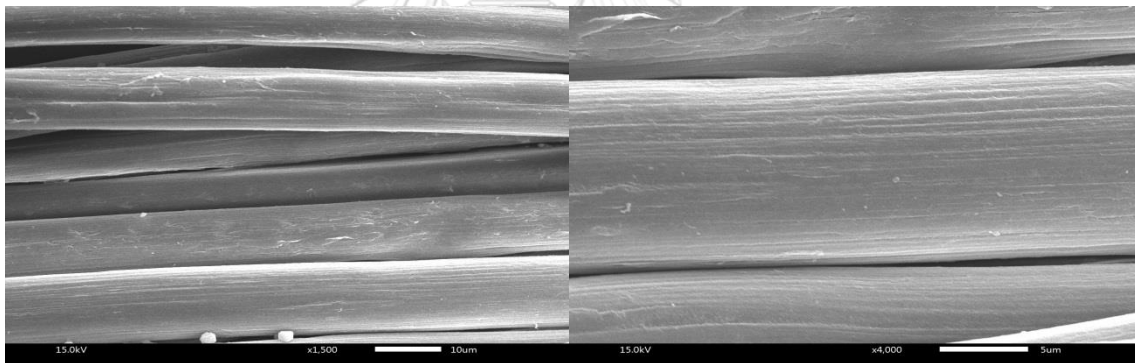
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

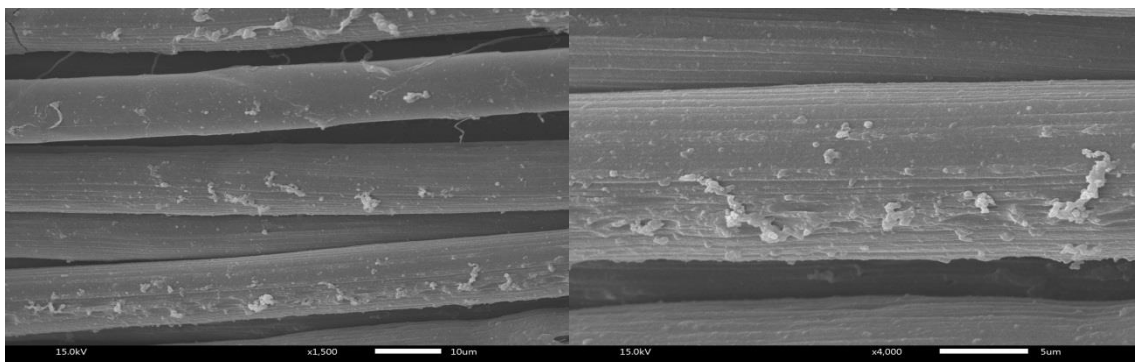
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของผ้าเอมอะรามิดที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิอะนิลีนในภาวะที่แตกต่างกัน แล้วหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวต่ำที่สุด จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ แสดงผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำผ้าเอมอะรามิดเปล่า ผ้าเอมอะรามิดดัดแปร ผ้าเอมอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน และผ้าเอมอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ที่ความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์ 5%, 10%, 15% และ 20% เข้าตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 400 เท่าแล้วได้ผลดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.10 นี้

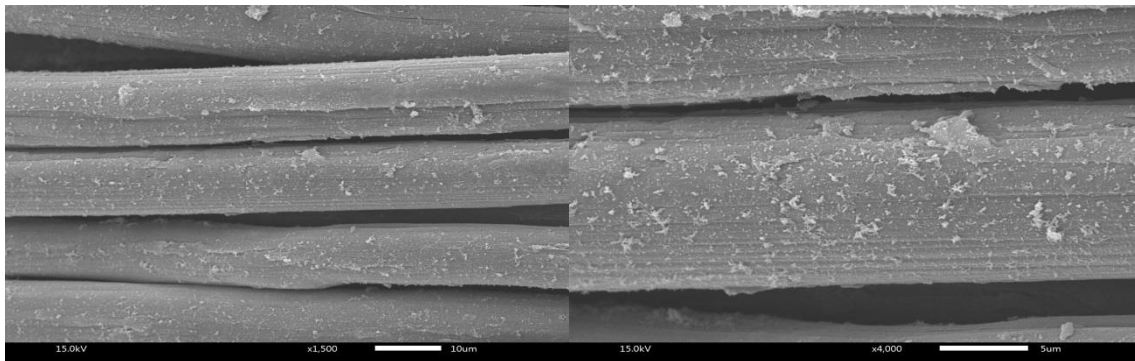


รูปที่ 4.1 รูป SEM ของผ้าเอมอะรามิดที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)

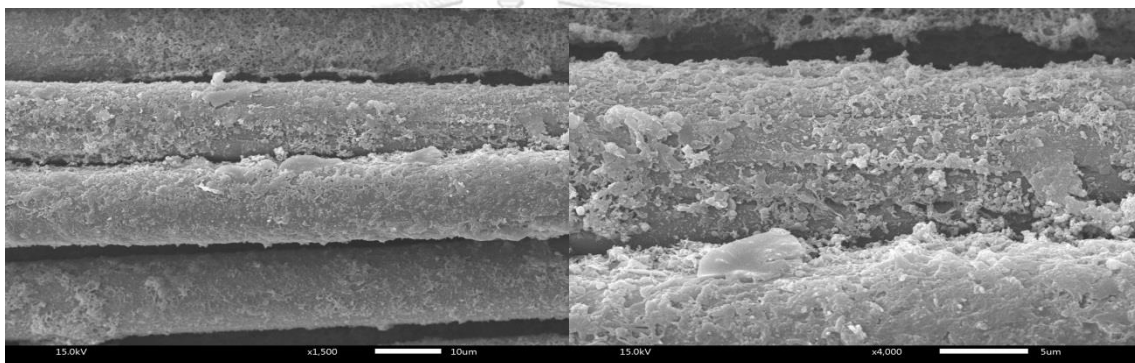


รูปที่ 4.2 รูป SEM ของผ้าเอมอะรามิดดัดแปรที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a)

และ 4000 เท่า (b)

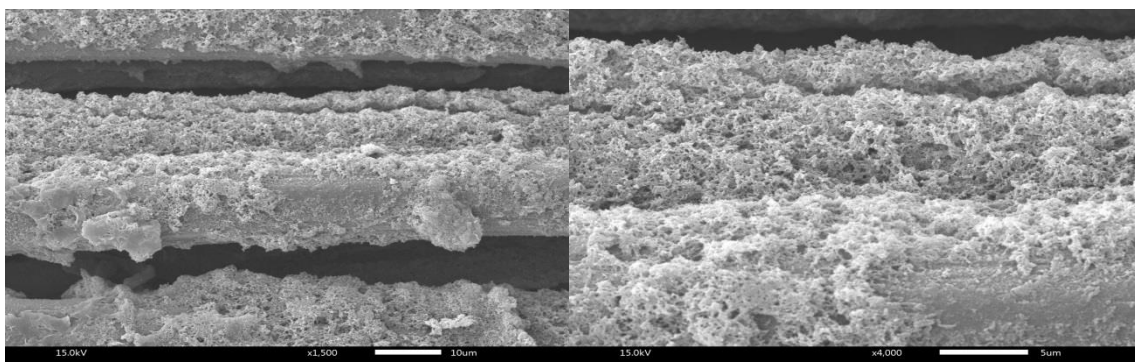


รูปที่ 4.3 รูป SEM ของผ้าเอพ็อกซีเรซินเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 5% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)

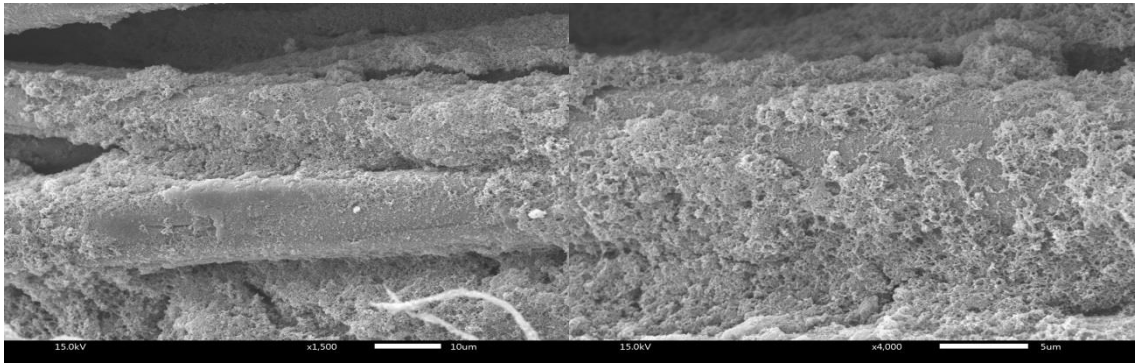


รูปที่ 4.4 รูป SEM ของผ้าเอพ็อกซีเรซินเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 10% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)

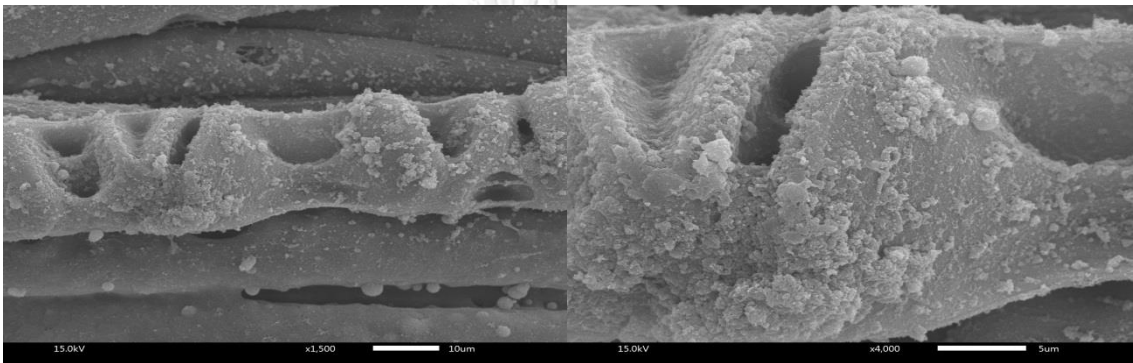
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



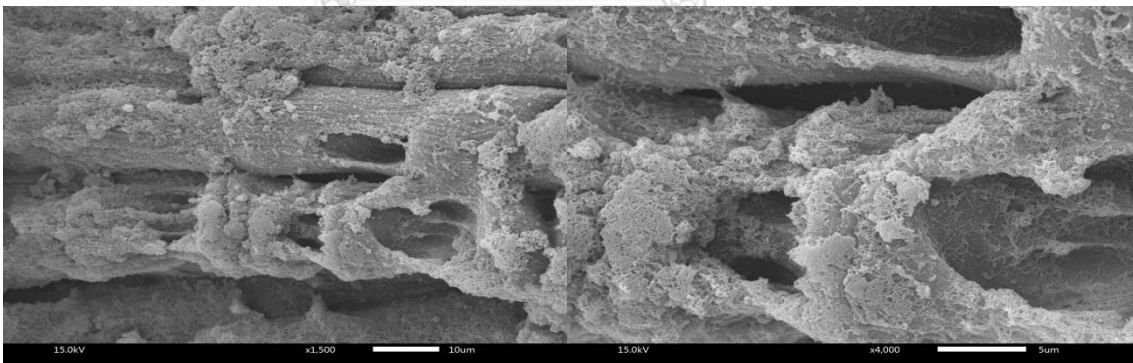
รูปที่ 4.5 รูป SEM ของผ้าเอพ็อกซีเรซินเคลือบพอลิอะนิลีน ความเข้มข้นอะนิลีน 15% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)



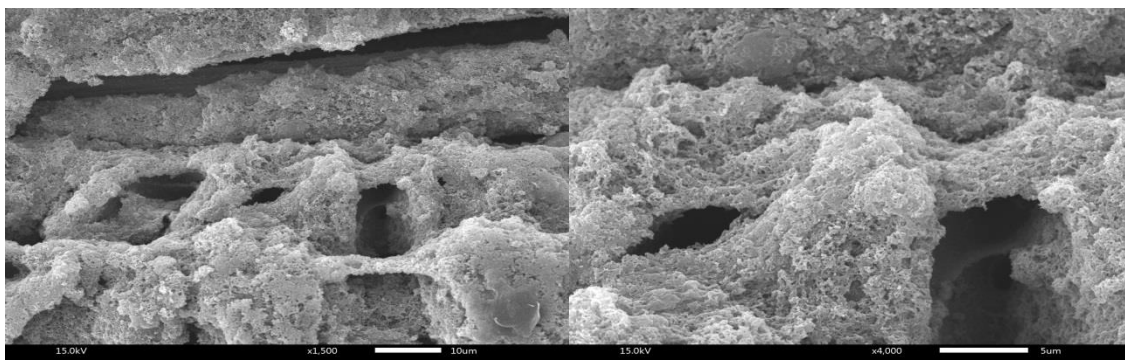
รูปที่ 4.6 รูป SEM ของผ้าเอพ็อกซีเรซินเคลือบพอลิอะซิโตน ความเข้มข้นอะซิโตน 20% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)



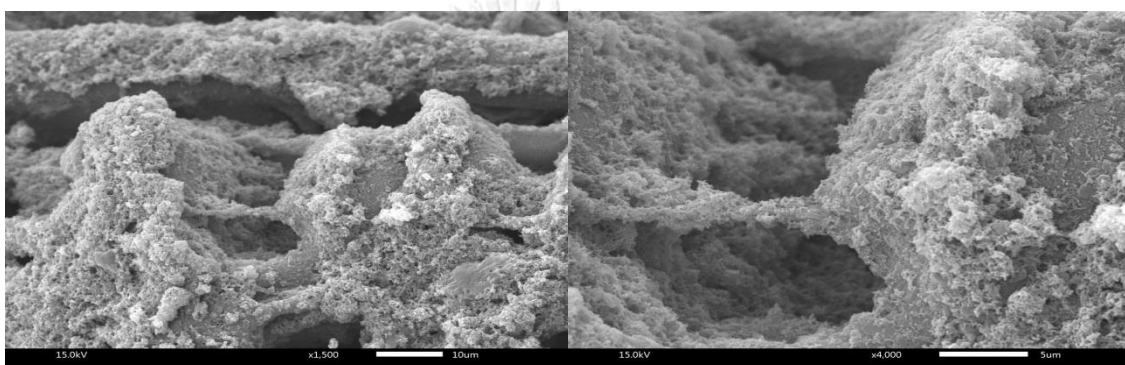
รูปที่ 4.7 รูป SEM ของผ้าเอพ็อกซีเรซินดัดแปรเคลือบพอลิอะซิโตน ความเข้มข้นอะซิโตน 5% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)



รูปที่ 4.8 รูป SEM ของผ้าเอพ็อกซีเรซินดัดแปรเคลือบพอลิอะซิโตน ความเข้มข้นอะซิโตน 10% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)



รูปที่ 4.9 รูป SEM ของผ้าเอี๊ยมอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะซิโตนีล ความเข้มข้นอะซิโตนีล 15% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)



รูปที่ 4.10 รูป SEM ของผ้าเอี๊ยมอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะซิโตนีล ความเข้มข้นอะซิโตนีล 20% ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (a) และ 4000 เท่า (b)

จากรูปที่ผ่านการตรวจลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูปที่ 4.1 ถึง 4.10 นั้นพบว่า ผ้าเอี๊ยมอะรามิดเปล่านั้นมีลักษณะของเส้นใยที่เรียบ ความห่างของเส้นใยยังสังเกตเห็นได้ที่กำลังขยาย 1500 เท่า และในกรณีของซิปสเตอร์ที่เป็นผ้าเอี๊ยมอะรามิดนั้น พอลิอะซิโตนีลที่เกิดขึ้นมีลักษณะเคลือบไปตามเส้นใยอะรามิด เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะซิโตนีลมอนอเมอร์ขึ้น พอลิอะซิโตนีลที่เกิดขึ้นมีลักษณะหนาขึ้น ช่องว่างระหว่างเส้นใยดูแคบลง การเคลือบติดของพอลิอะซิโตนีลดูมีความสม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย ส่วนในกรณีที่ซิปสเตอร์ที่เป็นเอี๊ยมอะรามิดที่ถูกดัดแปรนั้น เส้นใยอะรามิดที่ถูกดัดแปรจะถูกทำลายบางส่วน ดังสังเกตเห็นในรูปที่ 4.2 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะซิโตนีลมอนอเมอร์แล้วนั้น พอลิอะซิโตนีลที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะหนาขึ้นโดยเคลือบตามแนวเส้นใย ช่องว่างระหว่างเส้นใยดูแคบลงเช่นกัน แต่การเคลือบติดของพอลิอะซิโตนีลจะดูไม่มีความสม่ำเสมอเท่ากับการที่ใช้ซิปสเตอร์เป็นผ้าเอี๊ยมอะรามิดเปล่า อาจเป็นเพราะเส้นใยอะรามิดที่ถูกดัดแปรนั้นได้ถูกทำลายไปบางส่วนในขั้นตอนของปฏิกิริยาในเตรนซ์ที่ใช้กรด

เข้มข้น จึงทำให้พอลิอะนิลีนที่เคลือบขึ้นมาภายหลังไม่สามารถเกาะกันอย่างสม่ำเสมอเหมือนกับชั้นสเตรตที่เป็นผ้าเอมอะรามิดเปล่าได้

4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เมื่อนำผ้าเอมอะรามิดไปตัดแปรผ่านปฏิกิริยาไนเตรชัน/รีดักชันแล้วจะเห็นความแตกต่างระหว่างรูปที่ 4.11 และ 4.12 คือ ผ้าเอมอะรามิดที่ถูกตัดแปรจะเกิดพีคที่เลขคลื่น 3300 cm^{-1} และ 2923 cm^{-1} สื่อถึงการเกิดการสั่นแบบยืดของหมู่ NH_2 , เกิดพีคที่เลขคลื่น 1538 cm^{-1} และ 1282 cm^{-1} เนื่องด้วยการสั่นแบบงอของหมู่ NO_2 ส่วนในย่าน fingerprint การเกิดพีคที่เลขคลื่น 852 cm^{-1} , 774 cm^{-1} และ 680 cm^{-1} ของผ้าเอมอะรามิดซึ่งหมายถึงการแทนที่ของหมู่เบนซีนแบบเมตาในรูปที่ 4.11 ไปเป็นการแทนที่สามหมู่ซึ่งจะแสดงพีคที่เลขคลื่น 874 cm^{-1} , 824 cm^{-1} และ 708 cm^{-1} ตามลำดับ

สำหรับการเคลือบด้วยพอลิอะนิลีนนั้น ไม่ว่าจะเป็ชั้นสเตรตที่เป็นผ้าเอมอะรามิดเปล่าหรือผ้าเอมอะรามิดที่ถูกตัดแปร ก็ให้สเปกตรัมที่คล้ายกัน ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 คือที่เลขคลื่นประมาณ 1560 cm^{-1} เกิดพีคการสั่นแบบยืดของหมู่ $\text{C}=\text{N}$, ที่เลขคลื่นประมาณ 1460 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืดของหมู่ $\text{C}=\text{C}$ ในวงอะโรมาติก, ที่เลขคลื่นประมาณ 1285 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบงอของหมู่ $\text{C}-\text{N}$ และที่เลขคลื่นประมาณ 1035 cm^{-1} กับ 771 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบงอหมู่ $\text{C}-\text{H}$ ของวงอะโรมาติก ในและนอกกระนาบตามลำดับ

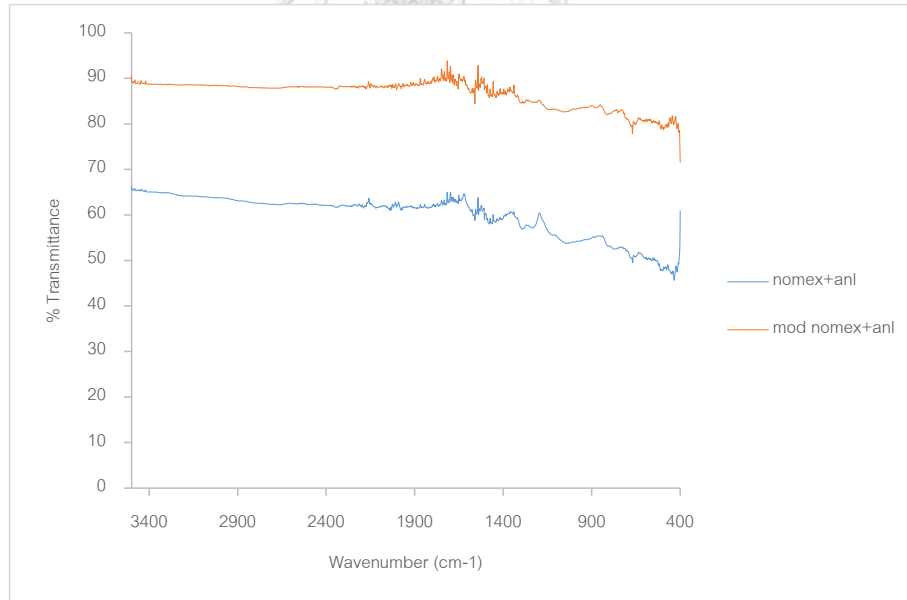
การโคปภายหลังการเคลือบพอลิอะนิลีนทันที ไม่ได้เปลี่ยนแปลงสเปกตรัมไปเท่าไรนัก ดังจะเห็นว่ารูปที่ 4.15 ที่แสดงสเปกตรัมของ พอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด ที่ผ่านการโคป เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 ที่แสดงสเปกตรัมของ พอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด นั้นพบว่า การโคปทำให้พีคที่เลขคลื่น 1124 cm^{-1} กับ 774 cm^{-1} ปรากฏชัดขึ้น คือทำให้มีหมู่ $\text{C}-\text{H}$ ในวงอะโรมาติกมากขึ้น

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการซักนั้น สเปกตรัมปรากฏดังรูปที่ 4.16 พบว่าเกิดพีคที่เลขคลื่น 1582 cm^{-1} อันหมายถึงการสั่นของวงแหวนควินโนนอยด์ และที่เลขคลื่น $2914, 2485\text{ cm}^{-1}$ เกิดการสั่นแบบยืดของหมู่ $\text{C}-\text{H}$ จากนั้นนำชิ้นงานไปโคป ปรากฏสเปกตรัมดังรูปที่ 4.17 พบว่า พีคที่เลขคลื่น $2914, 2485$ และ 1601 cm^{-1} ลดความเข้มลง และมีความใกล้เคียงกับรูปที่ 4.13 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การซักทำให้โครงสร้างของพอลิอะนิลีนเปลี่ยนสภาพจาก Emeraldine salt ไปเป็น

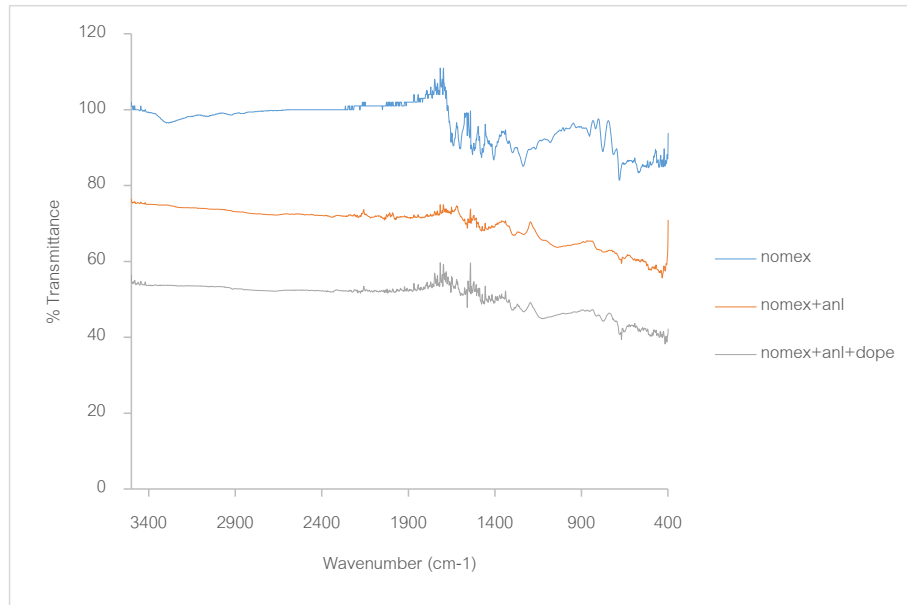
Emeraldine base และการโดปด้วยกรดไฮโดรคลอริกทำให้ Emeraldine base เปลี่ยนรูปกลับมาเป็น Emeraldine salt



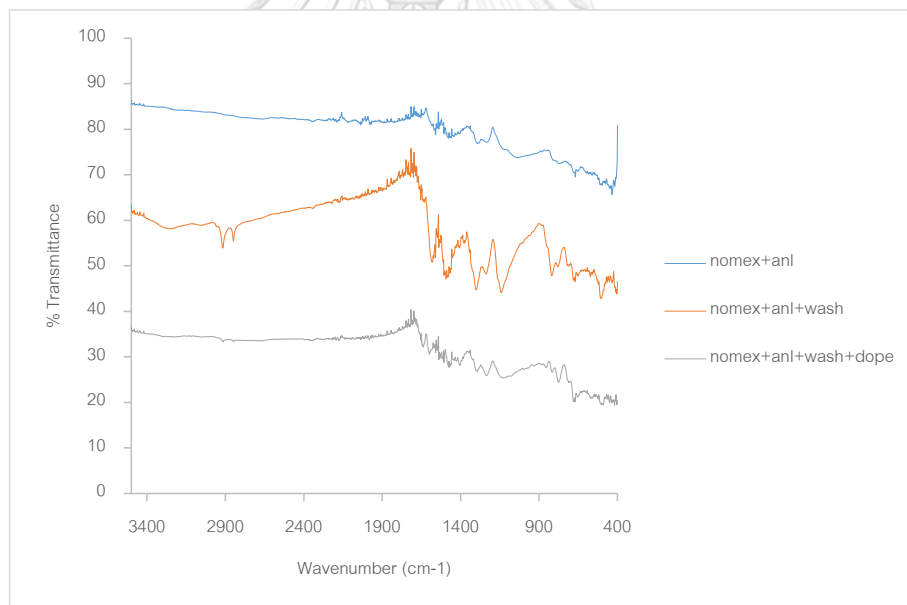
รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของผ้าเอมอะรามิดและผ้าเอมอะรามิดดัดแปร



รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของผ้าเอมอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน และผ้าเอมอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน



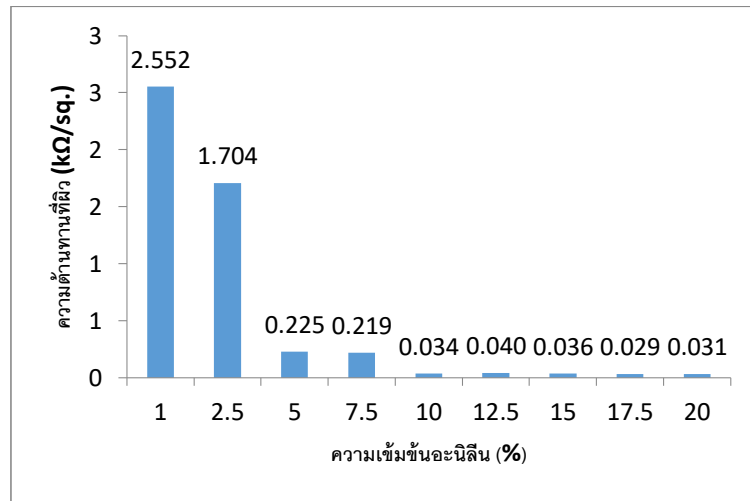
รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของผ้าเอีมีอะรามิด ผ้าเอีมีอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน และผ้าเอีมีอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการโดป



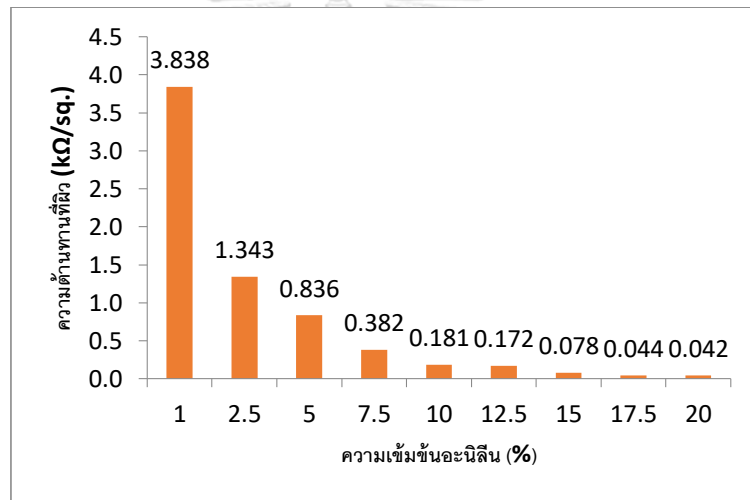
รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของผ้าเอีมีอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ผ้าเอีมีอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซัก และผ้าเอีมีอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซักแล้วโดป

4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและคำนวณประสิทธิภาพการปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

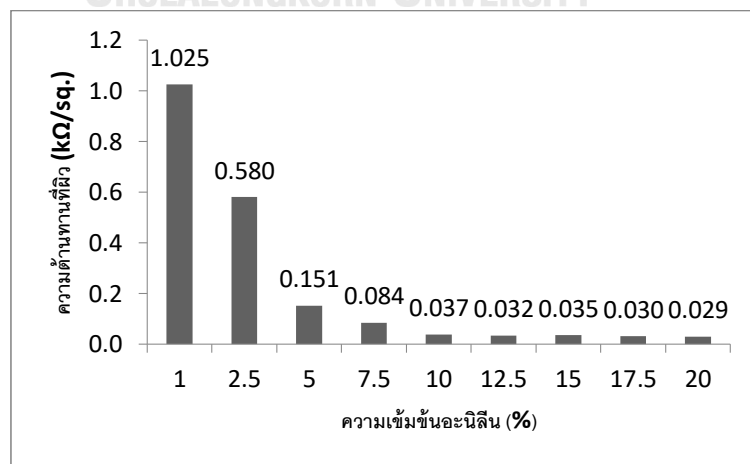
ทำการหาภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าความต้านทานที่ผิวดำที่สุด แล้วนำมาคำนวณประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.22 นี้



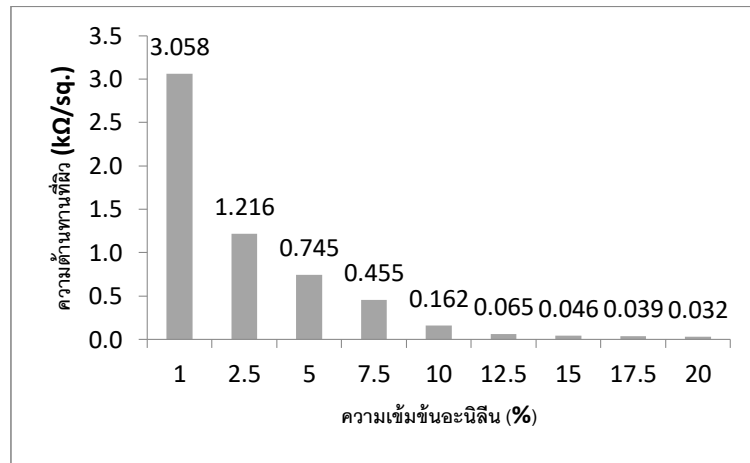
รูปที่ 4.15 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอ็มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิน



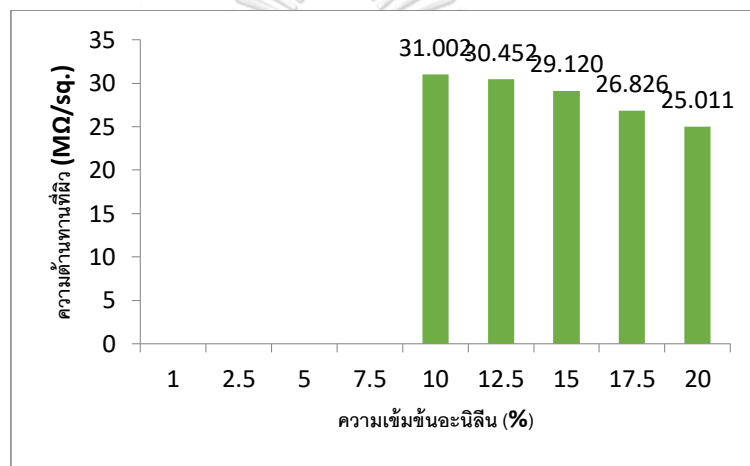
รูปที่ 4.16 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอ็มอะรามิดตัดแปรเคลือบพอลิอะนิน



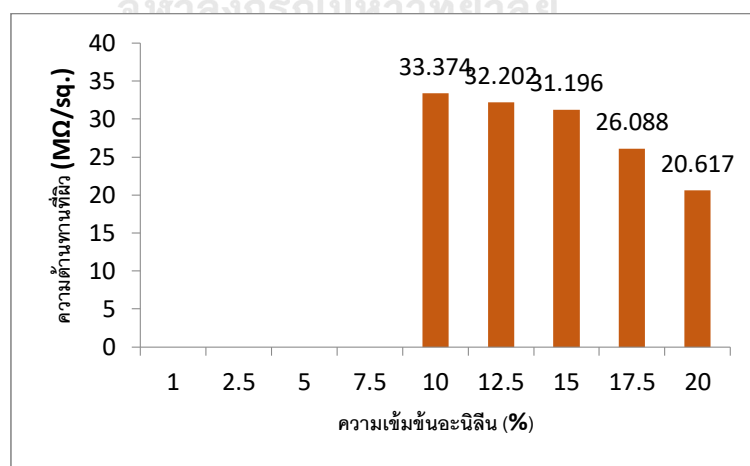
รูปที่ 4.17 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอ็มอะรามิดเคลือบพอลิอะนินที่ผ่านการโดป



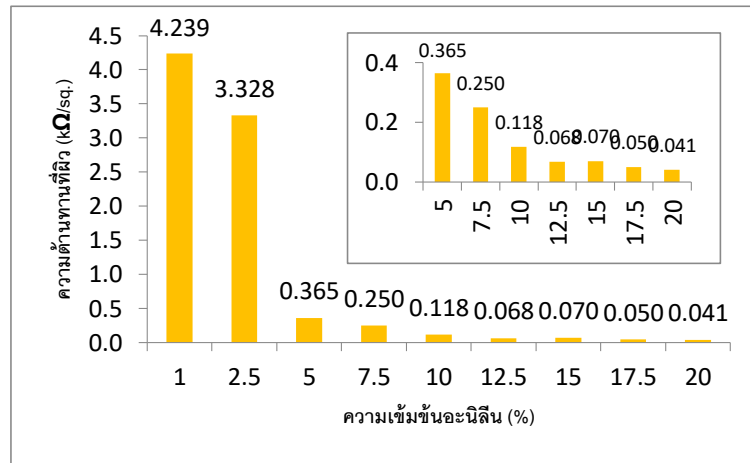
รูปที่ 4.18 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะมิโนที่ผ่านการโอบ



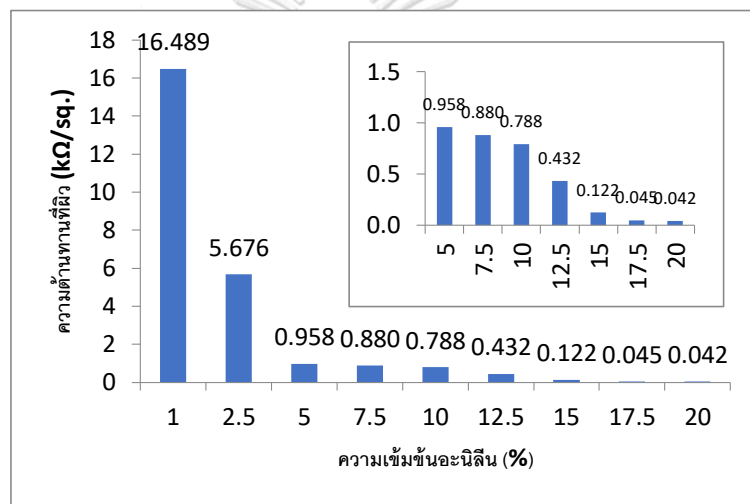
รูปที่ 4.19 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอ็มอะรามิดเคลือบพอลิอะมิโนที่ผ่านการซัก



รูปที่ 4.20 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะมิโนที่ผ่านการซัก



รูปที่ 4.21 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอมอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซักแล้วโดย



รูปที่ 4.22 ความต้านทานที่ผิวของผ้าเอมอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีนที่ผ่านการซักแล้วโดย

จากรูปที่ 4.15 ถึง 4.22 ที่วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของชิ้นงานในภาวะที่แตกต่างกัน ออกไปนั้นพบว่า เมื่อพิจารณาการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของ พอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด ในรูปที่ 4.15 นั้นจะพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์แล้วจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง จนถึงที่ความเข้มข้นอะนิลีน 10% พบว่าให้ค่าความต้านทานที่ผิวเท่ากับ 0.034 กิโลโอห์มต่อตาราง และหลังจากความเข้มข้นที่ 12.5% เป็นต้นไป ค่าความต้านทานไฟฟ้ามักมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่มากนัก จึงเลือกความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์ที่ 10% เป็นภาวะที่เหมาะสม และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของ พอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปร จะพบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมีค่าสูงกว่า คือ 0.181 กิโลโอห์มต่อตาราง สาเหตุที่เลือกซึบเสตรตเป็นผ้าเอมอะรามิดเปล่านั้นจะทำให้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของผ้าที่

เคลือบด้วยพอลิอะนิลีนมีค่าที่ต่ำกว่าการเลือกชั้นสเตรตเป็นผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปร เนื่องมาจาก ผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปรมีการถูกทำลายของเส้นใยลงไปบางส่วนจากขั้นตอนปฏิกิริยาในเตรชัน ทำให้พอลิอะนิลีนที่เคลือบลงไปไม่มีความสม่ำเสมอ การนำไฟฟ้าจึงดีไม่เท่าการเลือกชั้นสเตรตเป็น ผ้าเอ็มอะรามิดเปล่า

การโคปด้วยกรดไฮโดรคลอริก 10% ทันทีหลังจากการเคลือบพอลิอะนิลีน ไม่ได้ส่งผลให้ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวที่วัดได้มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือการโคปจะช่วยลดค่า ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวเพียงเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้นอะนิลีนที่ต่ำๆเท่านั้น (1-2.5%) และ หลังจากนั้นไปแทบไม่ส่งผลกระทบต่อ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของพอลิอะนิลีนที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในรูปของ emeraldine salt ที่ภายในโครงสร้างมีคู่ประจุตรงข้าม (counter ion) เกาะอยู่อย่างหนาแน่นมาก พออยู่แล้ว การโคปทันทีหลังจากการเคลือบจึงไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว

การนำชิ้นงานไปซักจะพบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมีค่าสูงขึ้นมากจนไม่สามารถวัด ค่าได้ในช่วงความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์ต่ำๆ จะเริ่มวัดได้ที่อะนิลีนมอนอเมอร์ 10% ค่า ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของ พอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิด และพอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิดดัดแปร คือ 31.002 และ 33.374 เมกะโห์มต่อตารางตามลำดับ เนื่องจากขั้นตอนการซักเกิดการหลุดออกของ คู่ประจุตรงข้าม เกิดการเปลี่ยนจากโครงสร้าง emeraldine salt ที่ชิ้นงานจะมีสีออกเขียว ไปเป็น emeraldine base ที่จะมีชิ้นงานสีออกม่วง จะกล่าวรายละเอียดต่อไปภายหลังในส่วนของ การวัด ค่าสี ส่วนการโคปหลังการซักนั้น สามารถทำให้ค่าความต้านทานลดกลับมาใกล้เคียงชิ้นงานที่ไม่ ผ่านการซักได้ กล่าวคือที่ความเข้มข้นอะนิลีนมอนอเมอร์ 10% เมื่อผ่านการโคปภายหลังการซักจะ ให้ค่าความต้านทานที่ผิวอยู่ที่ 0.118 กิโลโห์มต่อตาราง

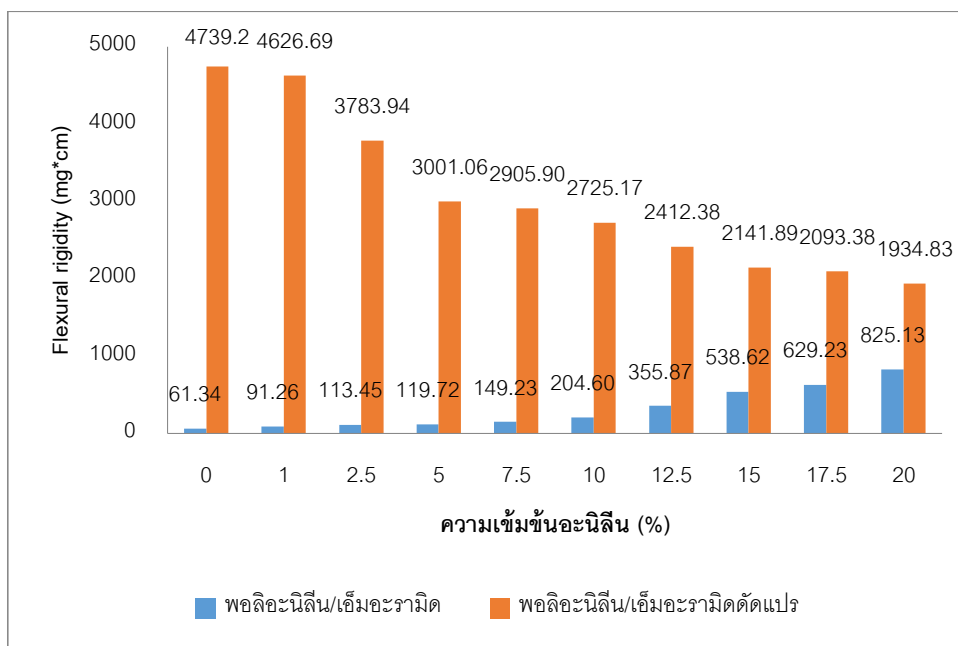
จากภาวะที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดจะพบว่า ที่ความเข้มข้น 10% อะนิลีน ให้ค่าความ ต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของ พอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิด ต่ำที่สุดคือ 0.034 กิโลโห์มต่อตาราง และเมื่อ นำไปคำนวณประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังสมการที่ 3.2 แล้วนั้นจะได้ค่า ประสิทธิภาพปิดกั้นเท่ากับ 20.99 เดซิเบลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นงานที่ภาวะต่างๆ

| ชิ้นงาน | ความต้านทานที่ผิว ($k\Omega/sq.$) | ประสิทธิภาพปิดกั้น สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (dB) |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|
| ผ้าเอี๋มอะรามิดเปล่า | N/A | N/A |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปร | N/A | N/A |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน | 0.034 | 20.99 |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน | 0.181 | 11.10 |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ที่ผ่านการโดป | 0.037 | 20.44 |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ที่ผ่านการโดป | 0.162 | 11.68 |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ที่ผ่านการซัก | 31002 | 0.001 |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ที่ผ่านการซัก | 33374 | 0.001 |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน ที่ผ่านการซักแล้วโดป | 0.118 | 13.40 |
| ผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ที่ผ่านการซักแล้วโดป | 0.788 | 4.99 |

4.4 ผลการวัดความแข็งแรงดัดโค้งของชิ้นงาน

การนำชิ้นงานไปใช้ในลักษณะการใช้งานของสิ่งทอ ควรพิจารณาความแข็งแรงของชิ้นงาน ซึ่งแสดงผลการวัดค่าสภาพแข็งแรงดัดโค้งของชิ้นงานได้ดังต่อไปนี้



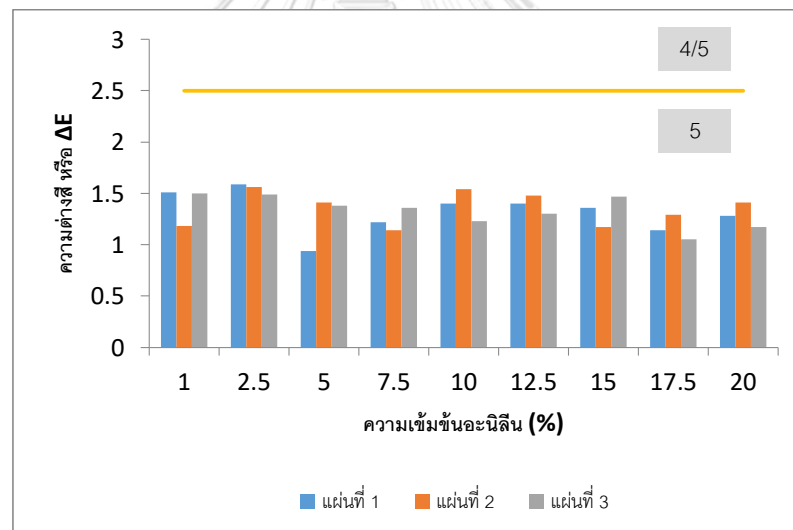
รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งกระด้างเมื่อตัดโค้งของพอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิด และพอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิดดัดแปร

รูปที่ 4.23 เป็นการเปรียบเทียบค่าความแข็งกระด้างเมื่อตัดโค้งของชิ้นงานใน 2 กรณีด้วยกันคือ การใช้เอ็มอะรามิดเปล่าเป็นชั้นสเตรต และการใช้เอ็มอะรามิดดัดแปรเป็นชั้นสเตรต จะพบว่ากรณีที่ใช้เอ็มอะรามิดเปล่าเป็นชั้นสเตรต เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์นั้น น้ำหนักของพอลิอะนิลีนจะมากขึ้น สายโซ่ที่มีวงอะโรมาติกจะมีมากขึ้น เมื่อทดสอบชิ้นงาน แนวนอนจะทำให้สายของพอลิอะนิลีนมีแนวโน้มที่จะต้านแรงโน้มถ่วงมากขึ้น ระยะความยาวที่ชิ้นงานตกถึงจุดกำหนดวัดได้มากขึ้น ค่าที่คำนวณได้เพื่อบอกความกระด้างก็จะมากขึ้น ในทางกลับกัน สำหรับชั้นสเตรตที่พื้นผิวถูกทำลายไปบางส่วนอย่างเช่นเอ็มอะรามิดที่ถูกดัดแปร ความไม่สม่ำเสมอของสายโซ่ที่มีวงอะโรมาติกของอะรามิดมีอยู่แต่เดิม เมื่อเคลือบพอลิอะนิลีนลงไป ความเข้มข้นที่มากขึ้น น้ำหนักของพอลิอะนิลีนจะยิ่งถ่วงชิ้นงานให้มีระยะตกที่สั้นลง ค่าความแข็งกระด้างเมื่อตัดโค้งที่คำนวณได้จะน้อยลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นอะนิลีน

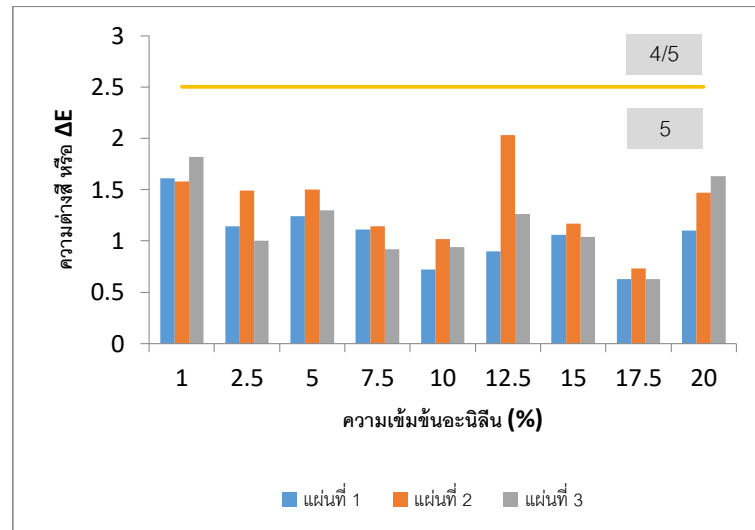
4.5 ผลการวัดความคงทนของสีต่อการซักของชิ้นงาน

จากการนำชิ้นงาน 2 ประเภท อันได้แก่ พอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิด และพอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิดดัดแปร ไปผ่านการทดสอบการซักตามมาตรฐาน ISO 105-C01 โดยมีผ้าประกะบสองชิ้นคือ

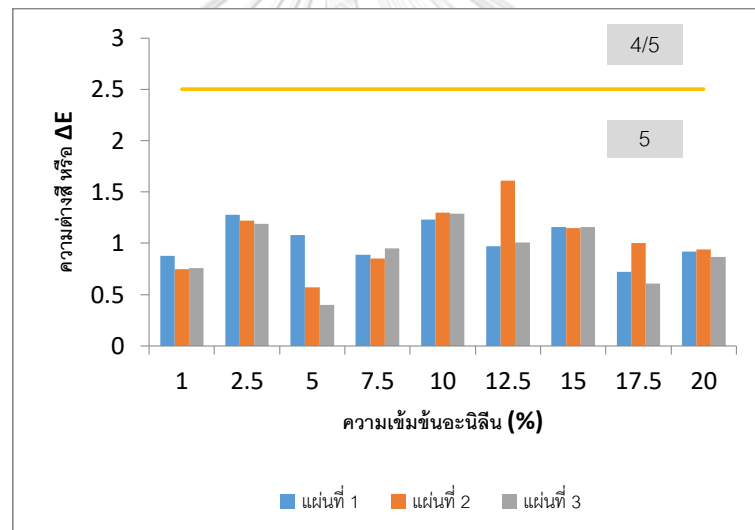
ผ้าเอมอะรามิดเปล่า กับผ้าฝ้าย ผลที่ได้พบว่า การวัดค่าความต่างของสีโดยใช้แถบสีเทาสำหรับวัดระดับการเปลี่ยนสีที่ใช้กับผ้าประเภททั้งสองนั้น เมื่อสังเกตด้วยตาพบว่าอยู่ในระดับ 5 (ดีเยี่ยม) ทุกตัวอย่าง และวัดค่าความต่างสีซ้ำอีกครั้งโดยใช้เครื่องวัดสี วัดค่า ΔL^* , Δa^* , Δb^* และ ΔE^* โดยค่า ΔL^* หมายถึงความต่างความสว่างสี ถ้ามีค่าบวกหมายถึงสีที่วัดได้มีความสว่างขึ้น ถ้ามีค่าลบหมายถึงสีที่วัดได้มีความมืดลง, ค่า Δa^* หมายถึงความต่างสีในเฉดสีเขียว-แดง ถ้ามีค่าบวกหมายถึงสีมีเฉดออกออกแดงมากขึ้น ถ้ามีค่าลบหมายถึงสีมีเฉดออกเขียวมากขึ้น, ค่า Δb^* หมายถึงความต่างสีในเฉดสีเหลือง-น้ำเงิน ถ้ามีค่าบวกหมายถึงสีมีเฉดออกเหลืองมากขึ้น ถ้ามีค่าลบหมายถึงสีมีเฉดออกน้ำเงินมากขึ้น นำสามค่าที่กล่าวมานี้คำนวณได้เป็นค่า ΔE^* เพื่ออธิบายความต่างสีว่าอยู่ในระดับใด (5-1, สีไม่มีความแตกต่างกัน-สีมีความแตกต่างกันมากที่สุด) โดยเทียบกับตารางที่ 3.3 สำหรับค่าความต่างสี (ΔE^*) ของผ้าประเภททั้งสองอันได้แก่เอมอะรามิดและผ้าฝ้าย แสดงดังรูปที่ 4.24 ถึง 4.27 นี้



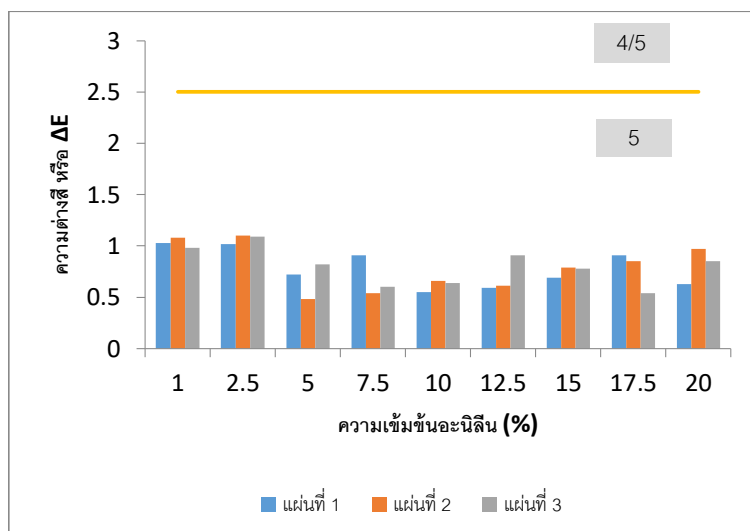
รูปที่ 4.24 ค่าความต่างสีของผ้าประเภทแผ่นที่ 1 (เอมอะรามิด)
สำหรับการทดสอบการซักของพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด



รูปที่ 4.25 ค่าความต่างสีของผ้าประเภทแผ่นที่ 1 (เอ็มอะรามิด) สำหรับการทดสอบการซักของพอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิดดัดแปร



รูปที่ 4.26 ค่าความต่างสีของผ้าประเภทแผ่นที่ 2 (ฝ้าย) สำหรับการทดสอบการซักของพอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิด

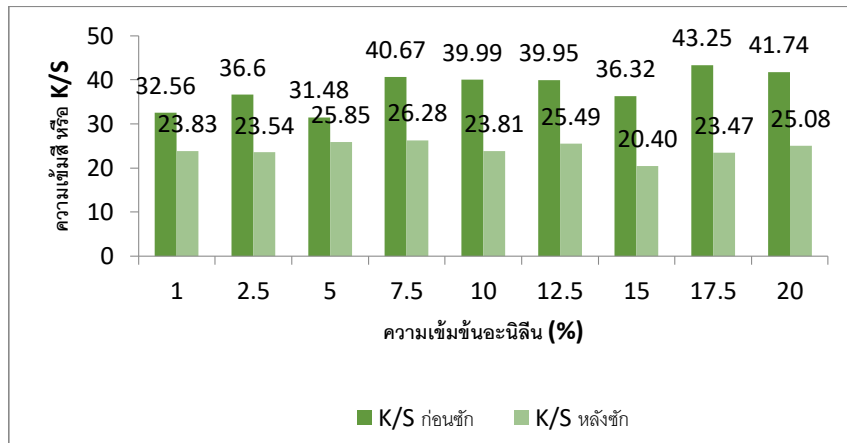


รูปที่ 4.27 ค่าความต่างสีของผ้าประกบแผ่นที่ 2 (ฝ้าย)

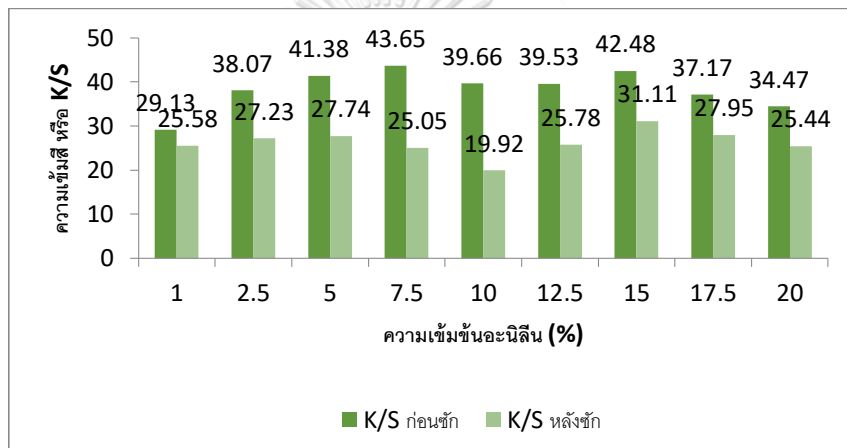
สำหรับการทดสอบการซักของพอลิอะนิลีน/เอ็มอะรามิดดัดแปร

จากการวัดค่าความต่างสี หรือ ΔE^* ของผ้าประกบทั้งสอง พบว่า ไม่ว่าจะเป็นการเคลือบพอลิอะนิลีนลงบนผ้าเอ็มอะรามิด หรือผ้าเอ็มอะรามิดที่ถูกดัดแปร ก็ให้ค่าความคงทนของสีต่อการซัก สำหรับการเปื้อนสี อยู่ที่ระดับ 5 คือค่าความต่างสีที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.79-1.33 คือสีไม่มีการเปื้อนติดเลย

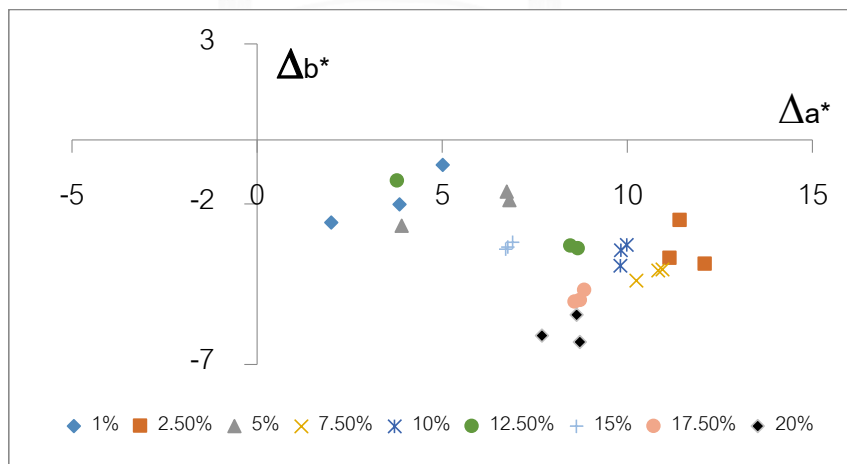
สำหรับการวัดค่าความคงทนของสีต่อการซักในแง่การเปลี่ยนสีนั้นไม่สามารถประเมินด้วยสายตาได้ เนื่องจากเฉดสีไม่ได้มีเพียงการเปลี่ยนสีในแง่ของการซีดลงเพียงอย่างเดียว แต่มีการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีอันเนื่องมาจากโครงสร้างของพอลิอะนิลีนที่เปลี่ยนไปจากสีเขียว (emeraldine salt) เป็นสีน้ำเงิน-ม่วง (emeraldine base) ซึ่งยืนยันได้จากการวัดค่าสีคือค่า Δa^* มีค่าเป็นบวก และ Δb^* มีค่าเป็นลบในทุกๆ ตัวอย่าง หมายความว่าสีมีแนวโน้มเปลี่ยนไปทางแดงแดงและน้ำเงินมากขึ้น หมายถึงสีจะออกน้ำเงิน-ม่วงมากขึ้น ส่วนค่าความเข้มสีหรือ K/S มีค่าลดลงทุกตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 และเมื่อนำค่าความเข้มสีมาเปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการทดสอบการซัก พบว่า ทั้งสองกรณีไม่ว่าจะเป็นการเลือกใช้เอ็มอะรามิดเป็นชั้นสเตรต หรือการใช้เอ็มอะรามิดดัดแปรเป็นชั้นสเตรต ให้ค่าความต่างของความเข้มสีโดยเฉลี่ยแล้วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (13.87 และ 12.19 ตามลำดับ)



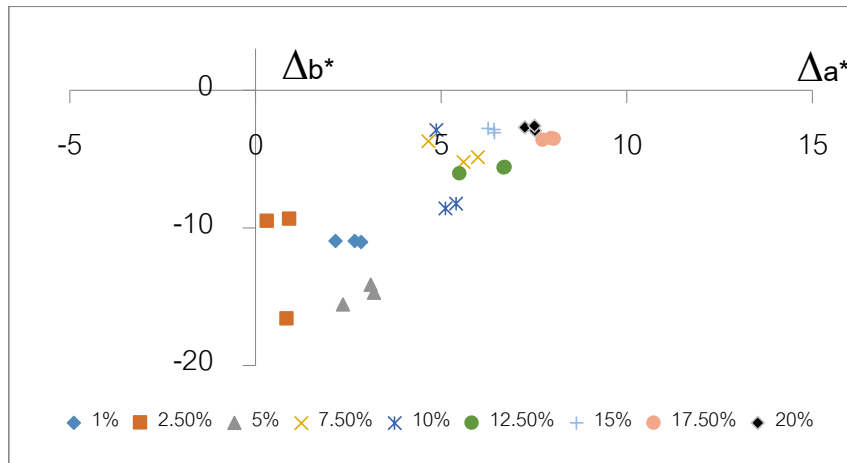
รูปที่ 4.28 ค่าความเข้มสี (K/S) ก่อนและหลังทดสอบการซักของ พอลิอะนิน/เอ็มอะรามิด



รูปที่ 4.29 ค่าความเข้มสี (K/S) ก่อนและหลังทดสอบการซักของ พอลิอะนิน/เอ็มอะรามิดดัดแปร



รูปที่ 4.30 ค่าความต่างสี (Δa^* และ Δb^*) ของพอลิอะนิน/เอ็มอะรามิด



รูปที่ 4.31 ค่าความต่างสี (Δa^* และ Δb^*) ของพอลิเอทิลีน/ไข่เมะรามิดัดแปร



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของผ้าเอมอะรามิดที่ต่อกิ่งด้วยพอลิอะนิลีนในภาวะต่างๆกัน ให้ผลการทดลองดังนี้

การต่อกิ่งพอลิอะนิลีนลงบนชั้นสเตรตที่ต่างกันสองชนิดอันได้แก่ผ้าเอมอะรามิด กับผ้าเอมอะรามิดที่ถูกดัดแปร ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวต่างกัน คือ ที่ความเข้มข้น 10% อะนิลีนมอนอเมอร์ ผ้าเอมอะรามิดเคลือบพอลิอะนิลีน และผ้าเอมอะรามิดดัดแปรเคลือบพอลิอะนิลีน ให้ค่าความต้านทานที่ผิวคือ 0.034 และ 0.181 กิโลโห์มต่อตาราง ซึ่งคิดเป็นค่าประสิทธิภาพปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 20.99 และ 11.10 เดซิเบลตามลำดับ

การโคปด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 10% ไม่ได้ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของพอลิอะนิลีนที่เคลือบบนผ้าเอมอะรามิดและผ้าเอมอะรามิดดัดแปรลดลงไป แต่การโคปหลังการซักจะช่วยลดค่าความต้านทานไฟฟ้าลงมา จาก 31.002 เมกะโห์มต่อตาราง สำหรับพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด และ 33.374 เมกะโห์มต่อตาราง สำหรับพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปร ลงมาที่ 0.118 และ 0.788 กิโลโห์มต่อตาราง ตามลำดับ

การวัดค่าสภาพแข็งเกร็งดัดโค้งของชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบความกระด้างของชิ้นงานพบว่า การเลือกใช้ผ้าเอมอะรามิดเป็นชั้นสเตรตจะให้ความกระด้างของชิ้นงานน้อยกว่าการเลือกใช้ผ้าเอมอะรามิดที่ถูกดัดแปรเป็นชั้นสเตรต และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์ ความกระด้างของชิ้นงานจะให้ผลแตกต่างกันคือ เมื่อความเข้มข้นของอะนิลีนเพิ่มขึ้น ความกระด้างของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นในกรณีที่ใช้ชั้นสเตรตเป็นผ้าเอมอะรามิด เนื่องจากสายโซ่ที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงมากขึ้นที่จะต้านแรงโน้มถ่วงในการทดสอบมากขึ้น ส่วนกรณีที่ใช้ผ้าเอมอะรามิดดัดแปรเป็นชั้นสเตรต เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะนิลีนมอนอเมอร์ ความกระด้างของชิ้นงานจะลดลงเนื่องจากน้ำหนักของพอลิอะนิลีนไปตกลงบนชั้นสเตรตที่พื้นผิวที่ขาดความสม่ำเสมอหรือถูกทำลายไปบางส่วน ทำให้ระยะตกของชิ้นงานสั้นลง สำหรับที่ความเข้มข้น 10% อะนิลีนมอนอเมอร์ ให้ค่าความแข็งกระด้างเมื่อดัดโค้งของ พอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด และพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปรที่ 204.60 และ 2725.17 มิลลิกรัมเซนติเมตร ตามลำดับ

การวัดความคงทนของสีต่อการซักของชิ้นงาน พบว่า ผ้าประภททั้งสองอันได้แก่ผ้าเอมอะรามิดเปล่า และผ้าย เมื่อผ่านการซักแล้วนำไปประเมินระดับสีโดยใช้แถบสีเทาสำหรับการเปลี่ยนสี พบว่าอยู่ที่ระดับ 5 ทุกตัวอย่าง วัดค่าความต่างสีซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันโดยใช้เครื่องวัดสี พบว่าค่าความต่างสี (ΔE^*) ของตัวอย่างทุกชิ้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 ซึ่งเทียบได้กับระดับ 5 เช่นกัน ส่วนการวัดค่าความคงทนของสีต่อการซักของ พอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด และพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด ที่ถูกดัดแปรนั้น ไม่เหมาะที่จะประเมินด้วยแถบสีเทาสำหรับการเปลี่ยนสี เนื่องมาจากการซักไม่ได้ทำให้ชิ้นงานมีสีซีดลงในเจดเดิม แต่การซักทำให้ชิ้นงานมีสีซีดลง ค่าความเข้มสีที่วัดได้โดยเฉลี่ยสำหรับพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิด และพอลิอะนิลีน/เอมอะรามิดดัดแปรอยู่ที่ 38.06 และ 24.19 ตามลำดับ ส่วนภายหลังจากการซักพบว่ามีความเข้มสีอยู่ที่ 24.19 และ 26.20 ตามลำดับ และเมื่อวัดค่าความต่างสีในเจดเขียว-แดง (Δa^*) ให้ผลเป็นบวกในทุกตัวอย่าง ส่วนค่าความต่างสีในเจดเหลือง-น้ำเงิน (Δb^*) ให้ผลเป็นลบในทุกตัวอย่าง กล่าวคือชิ้นงานที่ผ่านการซักจะมีสีเปลี่ยนไปในทาง น้ำเงิน-ม่วง อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนโครงสร้างของพอลิอะนิลีน และสีจะกลับมาใกล้เคียงเดิมอีกครั้งภายหลังจากการโดป

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. การดัดแปรพื้นผิวของผ้าสามารถทำได้แต่มีควรให้เส้นใยถูกทำลายไป
2. ควรคุมการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันให้เป็นอย่างช้าๆ เพื่อให้ได้ผ้าที่ผ่านการเคลือบมีความสม่ำเสมอ
2. การโดปภายหลังจากการซักส่งผลต่อค่าความต้านทานที่ลดลง ควรแปรความเข้มข้น และ/หรือ ชนิดของสารโดปเพื่อให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

บรรณานุกรม

- [1] ธาธาธิ์รเศรษฐ์, ว. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์อักษรสัมพันธ์, 2557.
- [2] ธาธาธิ์รเศรษฐ์, ว. ปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ตอนที่ 1). Techno&InnoMag 218 (2011): 52-56.
- [3] รุจิรวนิช, ร. การเตรียมแผ่นเส้นใยเซลลูโลสที่สังเคราะห์จากแบคทีเรียโดยมีอนุภาคระดับนาโนเมตรของโลหะเงินและผงแม่เหล็กเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [4] ธาธาธิ์รเศรษฐ์, ว. ปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ตอนจบ). Techno&InnoMag 220 (2011): 45-48.
- [5] ธาธาธิ์รเศรษฐ์, ว. ปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ตอนที่ 2). Techno&InnoMag 219 (2011): 46-48.
- [6] ชัยรัมย์, เ. พอลิอะนิลีนและอนุพันธ์นำไฟฟ้า: การสังเคราะห์ และการประยุกต์ใช้งาน Conductive polyaniline and its derivatives: synthesis and utilization. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 1 (2555): 76-82.
- [7] Kumar, D.a.S., R.C. Advance in conductive polymer. European Polymer Journal 34 (1998): 1053-1060.
- [8] ชิมประเสริฐ, ส. การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากคาร์บอนคอมพอสิตที่มีพอลิอะนิลีน. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [9] อุดมกิจเดชา, ว. วิทยาศาสตร์เส้นใย. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [10] สนธิสมบัติ, อ. กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ. ปทุมธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, 2545.
- [11] Hoghoghifard, S., Mokhtari, H., and Dehghani, S. Improving EMI shielding effectiveness and dielectric properties of polyaniline-coated polyester fabric by effective doping and redoping procedures. Journal of Industrial Textiles 47 (2018): 587-601.
- [12] Ztempien, Z., Rybicki, T., Rybicki, E., Kozanecki, M., and Szykowska, M.I. In-situ deposition of polyaniline and polypyrrole electroconductive layers on textile

- surfaces by the reactive ink-jet printing technique. Synthetic Metals 202 (2015): 49-62.
- [13] Muthukumar, N., Thilagavathi, G., and Kannaian, T. Polyaniline-coated nylon lycra fabrics for strain sensor and electromagnetic interference shielding applications. High Performance Polymers 27 (2015): 105-111.
- [14] อภิสันติยาคม, ส. กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์เบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [15] McKetta, J.J. Chemical processing handbook. New York: Marcel Dekker, 1993.
- [16] 76-2011, A.T.M. Electrical Surface Resistivity of Fabrics. 2011.
- [17] D3776-09, A. Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric.
- [18] D1388-96, A. Standard Test Method for Stiffness of Fabrics.
- [19] C01, I. Textiles – Tests for colour fastness Part C01: Colour fastness to washing: Test 1. 1989.
- [20] 121, ม. การประเมินการเปลี่ยนสีและการเปื้อนสี โดยใช้เกรย์สเกลและเครื่องมือ. 2552.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงาน

ตารางที่ ก1 ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ของผ้าเอ็มอะรามิดที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ความต้านทาน $k\Omega$ | | | | | | S.D. | ความ ต้านทานที่ผิว ($k\Omega/sq.$) |
|----------------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|-------|--------------------------------------------|
| | | ด้านที่ 1 | ด้านที่ 2 | ด้านที่ 3 | ด้านที่ 4 | เฉลี่ย 4 ด้าน | เฉลี่ย 3 แผ่น | | |
| 1 | 1 | 9.963 | 10.943 | 10.272 | 9.691 | 10.217 | | 2.346 | 2.552 |
| | 2 | 5.098 | 6.027 | 6.907 | 6.868 | 6.225 | 8.932 | | |
| | 3 | 10.142 | 10.915 | 10.137 | 10.226 | 10.355 | | | |
| 2.5 | 1 | 5.914 | 6.883 | 5.875 | 5.840 | 6.128 | | 0.156 | 1.704 |
| | 2 | 6.367 | 5.712 | 5.822 | 5.875 | 5.944 | 5.963 | | |
| | 3 | 5.976 | 5.824 | 5.896 | 5.576 | 5.818 | | | |
| 5 | 1 | 0.774 | 0.839 | 0.753 | 0.840 | 0.802 | | 0.029 | 0.225 |
| | 2 | 0.842 | 0.773 | 0.786 | 0.831 | 0.808 | 0.788 | | |
| | 3 | 0.715 | 0.776 | 0.764 | 0.765 | 0.755 | | | |
| 7.5 | 1 | 0.643 | 0.634 | 0.608 | 0.612 | 0.624 | | 0.159 | 0.219 |
| | 2 | 0.901 | 0.926 | 0.953 | 0.973 | 0.938 | 0.766 | | |
| | 3 | 0.784 | 0.748 | 0.704 | 0.703 | 0.735 | | | |
| 10 | 1 | 0.124 | 0.128 | 0.136 | 0.133 | 0.130 | | 0.016 | 0.034 |
| | 2 | 0.106 | 0.095 | 0.081 | 0.124 | 0.102 | 0.120 | | |
| | 3 | 0.132 | 0.120 | 0.125 | 0.133 | 0.128 | | | |
| 12.5 | 1 | 0.112 | 0.128 | 0.131 | 0.116 | 0.122 | | 0.025 | 0.040 |
| | 2 | 0.130 | 0.145 | 0.130 | 0.114 | 0.130 | 0.140 | | |
| | 3 | 0.165 | 0.159 | 0.164 | 0.184 | 0.168 | | | |
| 15 | 1 | 0.110 | 0.129 | 0.125 | 0.136 | 0.125 | | 0.024 | 0.036 |
| | 2 | 0.103 | 0.098 | 0.102 | 0.107 | 0.103 | 0.126 | | |
| | 3 | 0.145 | 0.127 | 0.167 | 0.161 | 0.150 | | | |
| 17.5 | 1 | 0.073 | 0.074 | 0.092 | 0.093 | 0.083 | | 0.024 | 0.029 |
| | 2 | 0.130 | 0.140 | 0.113 | 0.136 | 0.130 | 0.103 | | |
| | 3 | 0.095 | 0.091 | 0.094 | 0.107 | 0.097 | | | |
| 20 | 1 | 0.121 | 0.114 | 0.118 | 0.109 | 0.116 | | 0.007 | 0.031 |
| | 2 | 0.103 | 0.110 | 0.105 | 0.102 | 0.105 | 0.107 | | |
| | 3 | 0.085 | 0.103 | 0.102 | 0.116 | 0.102 | | | |

ตารางที่ ก2 ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ของผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปร
ที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ความต้านทาน $k\Omega$ | | | | | | S.D. | ความต้านทาน ที่ผิว ($k\Omega/sq.$) |
|----------------------------|---------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|-------|-----------------------------------------|
| | | ด้านที่ 1 | ด้านที่ 2 | ด้านที่ 3 | ด้านที่ 4 | เฉลี่ย 4 ด้าน | เฉลี่ย 3 แผ่น | | |
| 1 | 1 | 13.530 | 11.976 | 12.634 | 12.079 | 12.555 | | 1.521 | 3.838 |
| | 2 | 14.992 | 14.251 | 14.411 | 17.106 | 15.190 | 13.434 | | |
| | 3 | 12.425 | 11.932 | 12.559 | 13.316 | 12.558 | | | |
| 2.5 | 1 | 4.399 | 4.415 | 4.390 | 4.392 | 4.399 | | 0.274 | 1.343 |
| | 2 | 5.981 | 4.380 | 4.293 | 4.387 | 4.760 | 4.699 | | |
| | 3 | 5.172 | 5.201 | 4.235 | 5.140 | 4.937 | | | |
| 5 | 1 | 2.297 | 2.256 | 2.175 | 2.239 | 2.242 | | 0.595 | 0.836 |
| | 2 | 3.353 | 3.513 | 3.594 | 2.831 | 3.323 | 2.927 | | |
| | 3 | 3.724 | 2.955 | 3.120 | 3.061 | 3.215 | | | |
| 7.5 | 1 | 1.263 | 1.256 | 1.250 | 1.263 | 1.258 | | 0.098 | 0.382 |
| | 2 | 1.431 | 1.761 | 1.217 | 1.374 | 1.446 | 1.336 | | |
| | 3 | 1.348 | 1.286 | 1.323 | 1.261 | 1.305 | | | |
| 10 | 1 | 0.412 | 0.463 | 0.546 | 0.494 | 0.479 | | 0.190 | 0.181 |
| | 2 | 0.907 | 0.741 | 0.845 | 0.891 | 0.846 | 0.633 | | |
| | 3 | 0.632 | 0.495 | 0.619 | 0.553 | 0.575 | | | |
| 12.5 | 1 | 0.527 | 0.490 | 0.593 | 0.612 | 0.556 | | 0.047 | 0.172 |
| | 2 | 0.694 | 0.531 | 0.666 | 0.704 | 0.649 | 0.603 | | |
| | 3 | 0.632 | 0.574 | 0.601 | 0.615 | 0.606 | | | |
| 15 | 1 | 0.410 | 0.391 | 0.356 | 0.394 | 0.388 | | 0.100 | 0.078 |
| | 2 | 0.221 | 0.271 | 0.219 | 0.225 | 0.234 | 0.274 | | |
| | 3 | 0.249 | 0.154 | 0.186 | 0.209 | 0.200 | | | |
| 17.5 | 1 | 0.188 | 0.180 | 0.159 | 0.173 | 0.175 | | 0.020 | 0.044 |
| | 2 | 0.112 | 0.158 | 0.132 | 0.160 | 0.141 | 0.153 | | |
| | 3 | 0.155 | 0.116 | 0.138 | 0.159 | 0.142 | | | |
| 20 | 1 | 0.193 | 0.112 | 0.135 | 0.122 | 0.141 | | 0.014 | 0.042 |
| | 2 | 0.170 | 0.113 | 0.118 | 0.140 | 0.135 | 0.146 | | |
| | 3 | 0.147 | 0.181 | 0.184 | 0.135 | 0.162 | | | |

ตารางที่ ก3 ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ของผ้าเอ็มอะรามิดที่เคลือบพอลิอะซิโตน
แล้วโดย

| ความเข้มข้น อะซิโตน (%) | แผ่นที่ | ความต้านทาน $k\Omega$ | | | | | | S.D. | ความต้านทาน ที่ผิว ($k\Omega/sq.$) |
|----------------------------|---------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|-------|-----------------------------------------|
| | | ด้านที่ 1 | ด้านที่ 2 | ด้านที่ 3 | ด้านที่ 4 | เฉลี่ย 4 ด้าน | เฉลี่ย 3 แผ่น | | |
| 1 | 1 | 3.008 | 3.447 | 3.791 | 3.110 | 3.339 | | 0.219 | 1.025 |
| | 2 | 3.316 | 3.881 | 3.651 | 4.145 | 3.748 | 3.589 | | |
| | 3 | 3.370 | 3.862 | 3.905 | 3.581 | 3.680 | | | |
| 2.5 | 1 | 2.054 | 1.916 | 2.702 | 1.732 | 2.101 | | 0.125 | 0.580 |
| | 2 | 1.916 | 1.794 | 1.911 | 1.920 | 1.885 | 2.029 | | |
| | 3 | 2.195 | 1.985 | 2.133 | 2.094 | 2.102 | | | |
| 5 | 1 | 0.560 | 0.602 | 0.683 | 0.626 | 0.618 | | 0.078 | 0.151 |
| | 2 | 0.471 | 0.435 | 0.518 | 0.511 | 0.484 | 0.528 | | |
| | 3 | 0.443 | 0.531 | 0.435 | 0.517 | 0.482 | | | |
| 7.5 | 1 | 0.221 | 0.204 | 0.218 | 0.235 | 0.220 | | 0.066 | 0.084 |
| | 2 | 0.280 | 0.352 | 0.327 | 0.331 | 0.323 | 0.295 | | |
| | 3 | 0.216 | 0.403 | 0.415 | 0.336 | 0.343 | | | |
| 10 | 1 | 0.113 | 0.132 | 0.113 | 0.142 | 0.125 | | 0.016 | 0.037 |
| | 2 | 0.151 | 0.139 | 0.147 | 0.143 | 0.145 | 0.128 | | |
| | 3 | 0.121 | 0.107 | 0.110 | 0.117 | 0.114 | | | |
| 12.5 | 1 | 0.115 | 0.106 | 0.118 | 0.115 | 0.114 | | 0.001 | 0.032 |
| | 2 | 0.114 | 0.110 | 0.103 | 0.124 | 0.113 | 0.113 | | |
| | 3 | 0.109 | 0.105 | 0.121 | 0.113 | 0.112 | | | |
| 15 | 1 | 0.117 | 0.124 | 0.125 | 0.110 | 0.119 | | 0.004 | 0.035 |
| | 2 | 0.120 | 0.116 | 0.122 | 0.123 | 0.120 | 0.122 | | |
| | 3 | 0.122 | 0.120 | 0.134 | 0.131 | 0.127 | | | |
| 17.5 | 1 | 0.111 | 0.135 | 0.126 | 0.104 | 0.119 | | 0.013 | 0.030 |
| | 2 | 0.088 | 0.084 | 0.112 | 0.093 | 0.094 | 0.106 | | |
| | 3 | 0.105 | 0.110 | 0.102 | 0.097 | 0.104 | | | |
| 20 | 1 | 0.102 | 0.105 | 0.116 | 0.113 | 0.109 | | 0.007 | 0.029 |
| | 2 | 0.101 | 0.118 | 0.107 | 0.089 | 0.104 | 0.103 | | |
| | 3 | 0.082 | 0.104 | 0.090 | 0.105 | 0.095 | | | |

ตารางที่ ก4 ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ของผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปร
ที่เคลือบพอลิอะนิลีนแล้วโดย

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ความต้านทาน $k\Omega$ | | | | | | S.D. | ความต้านทาน ที่ผิว ($k\Omega/sq.$) |
|----------------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|-------|-----------------------------------------|
| | | ด้านที่ 1 | ด้านที่ 2 | ด้านที่ 3 | ด้านที่ 4 | เฉลี่ย 4 ด้าน | เฉลี่ย 3 แผ่น | | |
| 1 | 1 | 11.463 | 10.968 | 10.686 | 11.586 | 11.176 | | 0.574 | 3.058 |
| | 2 | 9.049 | 10.406 | 10.770 | 10.034 | 10.065 | 10.704 | | |
| | 3 | 10.891 | 10.541 | 11.353 | 10.695 | 10.870 | | | |
| 2.5 | 1 | 4.042 | 4.291 | 4.245 | 4.191 | 4.192 | | 0.269 | 1.216 |
| | 2 | 3.907 | 3.803 | 4.183 | 4.198 | 4.023 | 4.255 | | |
| | 3 | 3.830 | 4.959 | 4.384 | 5.029 | 4.551 | | | |
| 5 | 1 | 2.210 | 2.216 | 2.049 | 1.795 | 2.068 | | 0.499 | 0.745 |
| | 2 | 2.643 | 2.507 | 3.934 | 3.127 | 3.053 | 2.607 | | |
| | 3 | 2.840 | 2.838 | 2.464 | 2.655 | 2.699 | | | |
| 7.5 | 1 | 1.834 | 1.021 | 1.781 | 1.930 | 1.642 | | 0.145 | 0.455 |
| | 2 | 1.536 | 1.543 | 1.251 | 1.385 | 1.429 | 1.592 | | |
| | 3 | 1.910 | 1.427 | 1.614 | 1.869 | 1.705 | | | |
| 10 | 1 | 0.427 | 0.449 | 0.468 | 0.391 | 0.434 | | 0.125 | 0.162 |
| | 2 | 0.603 | 0.558 | 0.585 | 0.586 | 0.583 | 0.566 | | |
| | 3 | 0.732 | 0.683 | 0.648 | 0.664 | 0.682 | | | |
| 12.5 | 1 | 0.289 | 0.332 | 0.205 | 0.237 | 0.266 | | 0.037 | 0.065 |
| | 2 | 0.181 | 0.187 | 0.230 | 0.174 | 0.193 | 0.227 | | |
| | 3 | 0.229 | 0.172 | 0.206 | 0.282 | 0.222 | | | |
| 15 | 1 | 0.161 | 0.142 | 0.145 | 0.176 | 0.156 | | 0.032 | 0.046 |
| | 2 | 0.126 | 0.121 | 0.129 | 0.141 | 0.129 | 0.160 | | |
| | 3 | 0.168 | 0.194 | 0.208 | 0.205 | 0.194 | | | |
| 17.5 | 1 | 0.133 | 0.130 | 0.098 | 0.133 | 0.124 | | 0.031 | 0.039 |
| | 2 | 0.125 | 0.112 | 0.115 | 0.095 | 0.112 | 0.135 | | |
| | 3 | 0.170 | 0.173 | 0.175 | 0.166 | 0.171 | | | |
| 20 | 1 | 0.136 | 0.102 | 0.108 | 0.109 | 0.114 | | 0.006 | 0.032 |
| | 2 | 0.117 | 0.115 | 0.082 | 0.101 | 0.104 | 0.111 | | |
| | 3 | 0.114 | 0.096 | 0.135 | 0.118 | 0.116 | | | |

ตารางที่ ก5 ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ของผ้าเอ็มอะรามิดที่เคลือบพอลิอะนิลีน
แล้วผ่านการซัก

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ความต้านทาน $M\Omega$ | | | | | | S.D. | ความต้านทาน ที่ผิว ($M\Omega/sq.$) |
|----------------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|-------|--------------------------------------------|
| | | ด้านที่ 1 | ด้านที่ 2 | ด้านที่ 3 | ด้านที่ 4 | เฉลี่ย 4 ด้าน | เฉลี่ย 3 แผ่น | | |
| 1 | 1 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | N/A | N/A |
| | 2 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | |
| | 3 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| 2.5 | 1 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | N/A | N/A |
| | 2 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | |
| | 3 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| 5 | 1 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | N/A | N/A |
| | 2 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | |
| | 3 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| 7.5 | 1 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | N/A | N/A |
| | 2 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | |
| | 3 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| 10 | 1 | 115.12 | 107.39 | 108.27 | 111.93 | 110.678 | | 2.179 | 31.002 |
| | 2 | 108.87 | 109.16 | 107.59 | 108.47 | 108.523 | 108.507 | | |
| | 3 | 105.94 | 106.11 | 106.31 | 106.92 | 106.320 | | | |
| 12.5 | 1 | 109.94 | 108.56 | 109.73 | 110.46 | 109.673 | | 4.111 | 30.452 |
| | 2 | 102.97 | 100.36 | 101.70 | 102.63 | 101.915 | 106.581 | | |
| | 3 | 108.50 | 107.63 | 108.61 | 107.88 | 108.155 | | | |
| 15 | 1 | 108.39 | 109.34 | 110.60 | 112.85 | 110.295 | | 8.041 | 29.12 |
| | 2 | 94.23 | 95.18 | 93.58 | 94.05 | 94.260 | 101.921 | | |
| | 3 | 101.87 | 102.56 | 99.67 | 100.73 | 101.208 | | | |
| 17.5 | 1 | 73.38 | 83.61 | 93.95 | 100.21 | 87.788 | | 6.566 | 26.826 |
| | 2 | 102.54 | 99.10 | 102.92 | 98.79 | 100.838 | 93.892 | | |
| | 3 | 97.48 | 92.69 | 90.14 | 91.89 | 93.050 | | | |
| 20 | 1 | 77.11 | 78.14 | 78.52 | 84.01 | 79.445 | | 7.380 | 25.011 |
| | 2 | 94.52 | 95.24 | 96.10 | 89.72 | 93.895 | 87.538 | | |
| | 3 | 88.56 | 87.82 | 88.58 | 92.14 | 89.275 | | | |

ตารางที่ 6 ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ของผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปรที่เคลือบพอลิอะนิลีน

ลิอะนิลีนแล้วผ่านการซัก

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ความต้านทาน $M\Omega$ | | | | | | S.D. | ความต้านทาน ที่ผิว ($M\Omega/sq.$) |
|----------------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|--------|--------------------------------------------|
| | | ด้านที่ 1 | ด้านที่ 2 | ด้านที่ 3 | ด้านที่ 4 | เฉลี่ย 4 ด้าน | เฉลี่ย 3 แผ่น | | |
| 1 | 1 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| | 2 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| | 3 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| 2.5 | 1 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| | 2 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| | 3 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| 5 | 1 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| | 2 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| | 3 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| 7.5 | 1 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| | 2 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| | 3 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | | | |
| 10 | 1 | 111.62 | 115.75 | 115.46 | 116.01 | 114.710 | | | |
| | 2 | 114.82 | 115.43 | 118.19 | 117.92 | 116.590 | 116.808 | 2.216 | 33.374 |
| | 3 | 118.55 | 119.38 | 119.03 | 119.54 | 119.125 | | | |
| 12.5 | 1 | 116.92 | 111.13 | 110.65 | 110.14 | 112.210 | | | |
| | 2 | 112.80 | 114.29 | 111.32 | 109.79 | 112.050 | 112.707 | 1.002 | 32.202 |
| | 3 | 108.86 | 117.54 | 114.95 | 114.09 | 113.860 | | | |
| 15 | 1 | 107.30 | 105.68 | 105.28 | 103.97 | 105.558 | | | |
| | 2 | 115.81 | 107.53 | 112.85 | 108.10 | 111.073 | 109.188 | 3.144 | 31.196 |
| | 3 | 104.65 | 111.80 | 112.46 | 114.82 | 110.933 | | | |
| 17.5 | 1 | 82.05 | 84.48 | 83.92 | 84.67 | 83.780 | | | |
| | 2 | 76.55 | 75.59 | 74.07 | 73.35 | 74.890 | 91.308 | 21.208 | 26.088 |
| | 3 | 115.38 | 115.72 | 115.24 | 114.67 | 115.253 | | | |
| 20 | 1 | 70.41 | 67.64 | 66.96 | 67.45 | 68.115 | | | |
| | 2 | 72.32 | 70.41 | 70.01 | 70.54 | 70.820 | 72.161 | 4.857 | 20.617 |
| | 3 | 80.15 | 77.09 | 76.57 | 76.38 | 77.548 | | | |

ตารางที่ ก7 ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ของผ้าเอ็มอะรามิดที่เคลือบพอลิอะนิลีน
แล้วผ่านการซักและโดป

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ความต้านทาน $k\Omega$ | | | | | | S.D. | ความต้านทาน ที่ผิว ($k\Omega/sq.$) |
|----------------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|-------|-----------------------------------------|
| | | ด้านที่ 1 | ด้านที่ 2 | ด้านที่ 3 | ด้านที่ 4 | เฉลี่ย 4 ด้าน | เฉลี่ย 3 แผ่น | | |
| 1 | 1 | 15.054 | 14.921 | 14.981 | 15.010 | 14.992 | | 0.297 | 4.239 |
| | 2 | 14.532 | 14.456 | 14.502 | 14.482 | 14.493 | 14.836 | | |
| | 3 | 15.018 | 14.990 | 15.037 | 15.047 | 15.023 | | | |
| 2.5 | 1 | 11.542 | 11.490 | 11.468 | 11.484 | 11.496 | | 0.340 | 3.328 |
| | 2 | 12.121 | 10.192 | 12.159 | 11.170 | 11.411 | 11.648 | | |
| | 3 | 12.285 | 12.296 | 12.279 | 11.287 | 12.037 | | | |
| 5 | 1 | 1.324 | 1.301 | 1.290 | 1.307 | 1.306 | | 0.141 | 0.365 |
| | 2 | 1.102 | 1.129 | 1.115 | 1.147 | 1.123 | 1.277 | | |
| | 3 | 1.382 | 1.434 | 1.446 | 1.341 | 1.401 | | | |
| 7.5 | 1 | 0.863 | 0.826 | 0.761 | 0.821 | 0.818 | | 0.060 | 0.250 |
| | 2 | 0.924 | 0.929 | 0.932 | 0.963 | 0.937 | 0.877 | | |
| | 3 | 0.919 | 0.833 | 0.916 | 0.832 | 0.875 | | | |
| 10 | 1 | 0.367 | 0.435 | 0.390 | 0.374 | 0.392 | | 0.090 | 0.118 |
| | 2 | 0.476 | 0.447 | 0.530 | 0.588 | 0.510 | 0.412 | | |
| | 3 | 0.388 | 0.285 | 0.311 | 0.348 | 0.333 | | | |
| 12.5 | 1 | 0.244 | 0.279 | 0.284 | 0.305 | 0.278 | | 0.037 | 0.068 |
| | 2 | 0.228 | 0.203 | 0.170 | 0.216 | 0.204 | 0.238 | | |
| | 3 | 0.266 | 0.273 | 0.185 | 0.204 | 0.232 | | | |
| 15 | 1 | 0.304 | 0.285 | 0.263 | 0.281 | 0.283 | | 0.040 | 0.070 |
| | 2 | 0.248 | 0.263 | 0.195 | 0.293 | 0.250 | 0.246 | | |
| | 3 | 0.235 | 0.200 | 0.210 | 0.171 | 0.204 | | | |
| 17.5 | 1 | 0.176 | 0.174 | 0.165 | 0.155 | 0.168 | | 0.010 | 0.050 |
| | 2 | 0.160 | 0.146 | 0.189 | 0.180 | 0.169 | 0.174 | | |
| | 3 | 0.181 | 0.182 | 0.216 | 0.162 | 0.185 | | | |
| 20 | 1 | 0.112 | 0.193 | 0.141 | 0.125 | 0.143 | | 0.013 | 0.041 |
| | 2 | 0.140 | 0.160 | 0.170 | 0.165 | 0.159 | 0.145 | | |
| | 3 | 0.115 | 0.163 | 0.132 | 0.121 | 0.133 | | | |

ตารางที่ 8 ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ของผ้าเอ็มอะรามิดดัดแปรที่เคลือบพอลิอะนิลีนแล้วผ่านการซักและโอบ

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ความต้านทาน $k\Omega$ | | | | | | S.D. | ความต้านทาน ที่ผิว ($k\Omega/sq.$) |
|----------------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|-------|-----------------------------------------|
| | | ด้านที่ 1 | ด้านที่ 2 | ด้านที่ 3 | ด้านที่ 4 | เฉลี่ย 4 ด้าน | เฉลี่ย 3 แผ่น | | |
| 1 | 1 | 53.183 | 51.962 | 51.254 | 50.414 | 51.703 | | 5.478 | 16.489 |
| | 2 | 62.158 | 71.669 | 53.012 | 49.196 | 59.009 | 57.713 | | |
| | 3 | 64.520 | 63.148 | 60.517 | 61.521 | 62.427 | | | |
| 2.5 | 1 | 20.094 | 20.147 | 20.196 | 19.887 | 20.081 | | 4.964 | 5.676 |
| | 2 | 14.691 | 14.718 | 14.901 | 14.872 | 14.796 | 19.864 | | |
| | 3 | 24.455 | 24.814 | 24.753 | 24.843 | 24.716 | | | |
| 5 | 1 | 3.992 | 3.885 | 4.054 | 3.959 | 3.973 | | 0.893 | 0.958 |
| | 2 | 3.820 | 3.841 | 3.436 | 3.931 | 3.757 | 3.353 | | |
| | 3 | 2.827 | 2.312 | 1.641 | 2.536 | 2.329 | | | |
| 7.5 | 1 | 2.962 | 3.305 | 2.934 | 2.451 | 2.913 | | 0.185 | 0.880 |
| | 2 | 3.667 | 3.647 | 2.513 | 3.290 | 3.279 | 3.081 | | |
| | 3 | 3.096 | 3.157 | 3.006 | 2.949 | 3.052 | | | |
| 10 | 1 | 2.783 | 2.915 | 2.869 | 2.903 | 2.868 | | 0.521 | 0.788 |
| | 2 | 2.985 | 1.803 | 2.038 | 1.940 | 2.192 | 2.758 | | |
| | 3 | 3.114 | 3.261 | 3.252 | 3.237 | 3.216 | | | |
| 12.5 | 1 | 1.833 | 1.863 | 1.592 | 1.663 | 1.738 | | 0.200 | 0.432 |
| | 2 | 1.436 | 1.365 | 1.376 | 1.256 | 1.358 | 1.512 | | |
| | 3 | 1.352 | 1.370 | 1.278 | 1.762 | 1.441 | | | |
| 15 | 1 | 0.660 | 0.649 | 0.667 | 0.631 | 0.652 | | 0.223 | 0.122 |
| | 2 | 0.631 | 0.237 | 0.308 | 0.504 | 0.420 | 0.426 | | |
| | 3 | 0.125 | 0.251 | 0.179 | 0.265 | 0.205 | | | |
| 17.5 | 1 | 0.147 | 0.121 | 0.132 | 0.132 | 0.133 | | 0.023 | 0.045 |
| | 2 | 0.183 | 0.193 | 0.130 | 0.154 | 0.165 | 0.158 | | |
| | 3 | 0.158 | 0.170 | 0.216 | 0.162 | 0.177 | | | |
| 20 | 1 | 0.120 | 0.132 | 0.121 | 0.143 | 0.129 | | 0.032 | 0.042 |
| | 2 | 0.221 | 0.183 | 0.219 | 0.118 | 0.185 | 0.148 | | |
| | 3 | 0.146 | 0.154 | 0.115 | 0.104 | 0.130 | | | |

ภาคผนวก ข

ความแข็งเกร็งกระด้างเมื่อตัดโค้งของชิ้นงาน

ตารางที่ ข1 ความแข็งกระด้างเมื่อตัดโค้งของผ้าเอ็มอะรามิดที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความ เข้มขึ้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | length of overhang (cm) | bending length (cm) | เฉลี่ย (cm) | น้ำหนักผ้า หลัง เคลือบ (g) | เฉลี่ย (g) | S.D. | เฉลี่ย (mg) | น้ำหนักต่อพื้นที่ (mg/cm ²) | flexural rigidity (mg*cm) |
|------------------------------------|---------|-------------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------------|---------------|-------|----------------|--------------------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 1 | 3.5 | 1.8 | | 1.654 | | | | | 61.34 |
| | 2 | 2.7 | 1.4 | 1.6 | 1.640 | 1.647 | 0.007 | 1647 | 16.47 | |
| | 3 | 3.1 | 1.6 | | 1.648 | | | | | |
| 1 | 1 | 3.2 | 1.6 | | 1.669 | | | | | 91.26 |
| | 2 | 4.0 | 2.0 | 1.8 | 1.645 | 1.655 | 0.012 | 1655 | 16.55 | |
| | 3 | 3.4 | 1.7 | | 1.651 | | | | | |
| 2.5 | 1 | 4.1 | 2.1 | | 1.664 | | | | | 113.45 |
| | 2 | 3.9 | 2.0 | 1.9 | 1.656 | 1.654 | 0.011 | 1654 | 16.54 | |
| | 3 | 3.4 | 1.7 | | 1.642 | | | | | |
| 5 | 1 | 4.0 | 2.0 | | 1.675 | | | | | 119.72 |
| | 2 | 4.0 | 2.0 | 1.9 | 1.649 | 1.657 | 0.016 | 1657 | 16.57 | |
| | 3 | 3.6 | 1.8 | | 1.646 | | | | | |
| 7.5 | 1 | 4.3 | 2.2 | | 1.692 | | | | | 149.23 |
| | 2 | 3.9 | 2.0 | 2.1 | 1.681 | 1.691 | 0.009 | 1691 | 16.91 | |
| | 3 | 4.2 | 2.1 | | 1.699 | | | | | |
| 10 | 1 | 4.4 | 2.2 | | 1.730 | | | | | 204.60 |
| | 2 | 4.8 | 2.4 | 2.3 | 1.707 | 1.719 | 0.012 | 1719 | 17.19 | |
| | 3 | 4.5 | 2.3 | | 1.719 | | | | | |
| 12.5 | 1 | 5.5 | 2.8 | | 1.763 | | | | | 355.87 |
| | 2 | 5.9 | 3.0 | 2.7 | 1.809 | 1.743 | 0.079 | 1743 | 17.43 | |
| | 3 | 5.0 | 2.5 | | 1.656 | | | | | |
| 15 | 1 | 5.6 | 2.8 | | 1.783 | | | | | 538.62 |
| | 2 | 6.8 | 3.4 | 3.1 | 1.833 | 1.808 | 0.025 | 1808 | 18.08 | |
| | 3 | 6.2 | 3.1 | | 1.808 | | | | | |
| 17.5 | 1 | 6.8 | 3.4 | | 1.841 | | | | | 629.23 |
| | 2 | 6.1 | 3.1 | 3.3 | 1.825 | 1.833 | 0.008 | 1833 | 18.33 | |
| | 3 | 6.6 | 3.3 | | 1.833 | | | | | |
| 20 | 1 | 6.6 | 3.3 | | 1.840 | | | | | 825.13 |
| | 2 | 7.2 | 3.6 | 3.6 | 1.845 | 1.844 | 0.004 | 1844 | 18.44 | |
| | 3 | 7.5 | 3.8 | | 1.848 | | | | | |

ตารางที่ ๒ ความแข็งกระด้างเมื่อตัดโค้งของผ้าเอี๊ยมอะรามิดตัดแปรที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความ เข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | length of overhang (cm) | bending length (cm) | เฉลี่ย (cm) | น้ำหนัก ผ้าหลัง เคลือบ (g) | เฉลี่ย (g) | S.D. | เฉลี่ย (mg) | น้ำหนักต่อพื้นที่ (mg/cm ²) | flexural rigidity (mg*cm) |
|-----------------------------------|---------|-------------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------------------|---------------|-------|----------------|--------------------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 1 | 12.5 | 6.3 | | 1.893 | | | | | |
| | 2 | 12.8 | 6.4 | 6.3 | 1.910 | 1.895 | 0.014 | 1895 | 18.95 | 4739.22 |
| | 3 | 12.5 | 6.3 | | 1.883 | | | | | |
| 1 | 1 | 12.4 | 6.2 | | 1.882 | | | | | |
| | 2 | 12.4 | 6.2 | 6.2 | 1.912 | 1.910 | 0.028 | 1910 | 19.10 | 4626.69 |
| | 3 | 12.6 | 6.3 | | 1.937 | | | | | |
| 2.5 | 1 | 12.1 | 6.1 | | 1.873 | | | | | |
| | 2 | 11.6 | 5.8 | 5.9 | 1.863 | 1.874 | 0.012 | 1874 | 18.74 | 3783.94 |
| | 3 | 11.5 | 5.8 | | 1.886 | | | | | |
| 5 | 1 | 11.4 | 5.7 | | 1.892 | | | | | |
| | 2 | 10.3 | 5.2 | 5.4 | 1.884 | 1.888 | 0.004 | 1888 | 18.88 | 3001.06 |
| | 3 | 10.8 | 5.4 | | 1.889 | | | | | |
| 7.5 | 1 | 10.8 | 5.4 | | 1.894 | | | | | |
| | 2 | 10.5 | 5.3 | 5.4 | 1.905 | 1.898 | 0.006 | 1898 | 18.98 | 2905.90 |
| | 3 | 10.8 | 5.4 | | 1.894 | | | | | |
| 10 | 1 | 10.6 | 5.3 | | 1.908 | | | | | |
| | 2 | 10.6 | 5.3 | 5.2 | 1.902 | 1.901 | 0.007 | 1901 | 19.01 | 2725.17 |
| | 3 | 10.2 | 5.1 | | 1.894 | | | | | |
| 12.5 | 1 | 9.7 | 4.9 | | 1.973 | | | | | |
| | 2 | 10.1 | 5.1 | 5.0 | 1.933 | 1.949 | 0.021 | 1949 | 19.49 | 2412.38 |
| | 3 | 10.1 | 5.1 | | 1.942 | | | | | |
| 15 | 1 | 9.7 | 4.9 | | 1.975 | | | | | |
| | 2 | 9.2 | 4.6 | 4.8 | 1.981 | 1.978 | 0.003 | 1978 | 19.78 | 2141.89 |
| | 3 | 9.7 | 4.9 | | 1.977 | | | | | |
| 17.5 | 1 | 9.5 | 4.8 | | 1.975 | | | | | |
| | 2 | 9.8 | 4.9 | 4.7 | 1.964 | 1.974 | 0.010 | 1974 | 19.74 | 2093.38 |
| | 3 | 9.1 | 4.6 | | 1.983 | | | | | |
| 20 | 1 | 9.4 | 4.7 | | 1.930 | | | | | |
| | 2 | 9.2 | 4.6 | 4.6 | 1.982 | 1.966 | 0.032 | 1966 | 19.66 | 1934.83 |
| | 3 | 9.1 | 4.6 | | 1.987 | | | | | |

ภาคผนวก ค

การวัดค่าสีของชิ้นงาน

ตารางที่ ค1 ค่าสีของผ้าเอมอะรามิดที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความ เข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | ΔE^* | K/S ก่อน ซัก | K/S หลังซัก | K/S หลัง ซักเฉลี่ย | S.D. |
|-----------------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-------------|-----------------------|------|
| 1 | 1 | -6.46 | 5.01 | -0.77 | 8.21 | | 24.92 | | 1.01 |
| | 2 | -2.84 | 2.00 | -2.57 | 4.33 | 32.56 | 22.93 | 23.83 | |
| | 3 | -4.49 | 3.84 | -2.01 | 6.24 | | 23.64 | | |
| 2.5 | 1 | -1.32 | 11.14 | -3.68 | 11.80 | | 24.01 | | 0.72 |
| | 2 | -1.99 | 12.09 | -3.87 | 12.85 | 36.60 | 22.71 | 23.54 | |
| | 3 | -1.11 | 11.42 | -2.50 | 11.74 | | 23.89 | | |
| 5 | 1 | -1.89 | 3.89 | -2.67 | 5.03 | | 27.58 | | 1.51 |
| | 2 | 0.09 | 6.80 | -1.87 | 7.05 | 31.48 | 24.78 | 25.85 | |
| | 3 | -0.64 | 6.73 | -1.61 | 6.95 | | 25.19 | | |
| 7.5 | 1 | -1.39 | 10.83 | -4.07 | 11.65 | | 26.63 | | 0.37 |
| | 2 | -1.19 | 10.24 | -4.38 | 11.20 | 40.67 | 25.89 | 26.28 | |
| | 3 | -1.28 | 10.94 | -4.03 | 11.73 | | 26.33 | | |
| 10 | 1 | -0.84 | 9.80 | -3.92 | 10.59 | | 23.89 | | 0.14 |
| | 2 | -0.58 | 9.81 | -3.43 | 10.41 | 39.99 | 23.89 | 23.81 | |
| | 3 | 0.18 | 9.97 | -3.27 | 10.49 | | 23.64 | | |
| 12.5 | 1 | 1.20 | 3.78 | -1.27 | 4.17 | | 29.31 | | 3.31 |
| | 2 | 1.55 | 8.66 | -3.38 | 9.42 | 39.95 | 23.76 | 25.49 | |
| | 3 | 1.32 | 8.46 | -3.30 | 9.17 | | 23.40 | | |
| 15 | 1 | 0.93 | 6.76 | -3.33 | 7.59 | | 20.66 | | 0.71 |
| | 2 | 1.22 | 6.89 | -3.18 | 7.69 | 36.32 | 19.59 | 20.40 | |
| | 3 | 0.89 | 6.71 | -3.40 | 7.57 | | 20.94 | | |
| 17.5 | 1 | 0.43 | 8.57 | -5.05 | 9.95 | | 21.64 | | 3.00 |
| | 2 | 0.51 | 8.84 | -4.68 | 10.01 | 43.25 | 21.84 | 23.47 | |
| | 3 | -1.53 | 8.72 | -4.99 | 10.17 | | 26.94 | | |
| 20 | 1 | -2.28 | 8.71 | -6.30 | 10.56 | | 27.79 | | 4.24 |
| | 2 | 0.16 | 7.69 | -6.09 | 9.81 | 41.74 | 20.20 | 25.08 | |
| | 3 | -1.26 | 8.62 | -5.44 | 10.27 | | 27.26 | | |

| | | | |
|-----------------|-----|------------|-------|
| wavelength (nm) | 360 | ผลต่าง K/S | 13.87 |
|-----------------|-----|------------|-------|

ตารางที่ ค2 ค่าสีของผ้าเอมอะรามิตดัดแปรที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความ เข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | ΔE^* | K/S ก่อน ซัก | K/S หลังซัก | K/S หลัง ซักเฉลี่ย | S.D. |
|-----------------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-------------|-----------------------|------|
| 1 | 1 | -7.21 | 2.15 | -10.95 | 13.29 | | 26.48 | | 0.81 |
| | 2 | -7.73 | 2.84 | -11.05 | 13.78 | 29.13 | 25.33 | 25.58 | |
| | 3 | -7.43 | 2.67 | -10.97 | 13.52 | | 24.92 | | |
| 2.5 | 1 | -5.05 | 0.30 | -9.52 | 10.78 | | 28.25 | | 0.97 |
| | 2 | -10.81 | 0.84 | -16.62 | 19.84 | 38.07 | 27.10 | 27.23 | |
| | 3 | -5.59 | 0.91 | -9.38 | 10.96 | | 26.33 | | |
| 5 | 1 | -13.79 | 3.10 | -14.15 | 20.22 | | 31.48 | | 6.48 |
| | 2 | -10.29 | 2.34 | -15.58 | 18.82 | 41.38 | 20.26 | 27.74 | |
| | 3 | -14.55 | 3.18 | -14.72 | 20.94 | | 31.48 | | |
| 7.5 | 1 | -0.03 | 5.60 | -5.21 | 7.65 | | 25.19 | | 1.35 |
| | 2 | 2.92 | 4.64 | -3.70 | 6.62 | 43.65 | 23.64 | 25.05 | |
| | 3 | 0.05 | 5.98 | -4.88 | 7.72 | | 26.33 | | |
| 10 | 1 | -0.17 | 5.10 | -8.61 | 10.01 | | 19.76 | | 0.76 |
| | 2 | 3.47 | 4.86 | -2.90 | 6.64 | 39.66 | 19.26 | 19.92 | |
| | 3 | -0.84 | 5.39 | -8.24 | 9.88 | | 20.75 | | |
| 12.5 | 1 | -3.03 | 6.69 | -5.65 | 9.26 | | 25.49 | | 0.41 |
| | 2 | -2.54 | 6.72 | -5.60 | 8.48 | 39.53 | 26.25 | 25.78 | |
| | 3 | -1.64 | 5.49 | -6.07 | 8.53 | | 25.59 | | |
| 15 | 1 | 1.46 | 6.41 | -2.86 | 7.17 | | 31.65 | | 0.54 |
| | 2 | 3.26 | 6.25 | -2.77 | 7.57 | 42.48 | 31.10 | 31.11 | |
| | 3 | 2.63 | 6.42 | -3.09 | 7.59 | | 30.58 | | |
| 17.5 | 1 | -0.67 | 8.04 | -3.57 | 8.82 | | 28.51 | | 0.49 |
| | 2 | -0.50 | 7.73 | -3.62 | 8.55 | 37.17 | 27.71 | 27.95 | |
| | 3 | -0.85 | 7.97 | -3.53 | 8.76 | | 27.63 | | |
| 20 | 1 | -2.44 | 7.52 | -2.95 | 8.44 | | 25.08 | | 0.53 |
| | 2 | -1.32 | 7.24 | -2.69 | 7.84 | 34.47 | 26.05 | 25.44 | |
| | 3 | -2.65 | 7.51 | -2.57 | 8.37 | | 25.20 | | |

| | | | |
|-----------------|---------|------------|-------|
| wavelength (nm) | 370-390 | ผลต่าง K/S | 12.19 |
|-----------------|---------|------------|-------|

ตารางที่ ค3 ค่าสีของผ้าเอี๋มอะรามิตประกบผ้าเอี๋มอะรามิตที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | ΔE^* | ΔE^* เฉลี่ย | S.D. |
|----------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|------|
| 1 | 1 | 0.43 | -0.89 | 1.14 | 1.51 | 1.40 | 0.19 |
| | 2 | 0.20 | -0.98 | 0.64 | 1.18 | | |
| | 3 | 0.33 | -0.91 | 1.15 | 1.50 | | |
| 2.5 | 1 | 1.07 | -1.13 | 0.30 | 1.59 | 1.55 | 0.05 |
| | 2 | 0.89 | -1.12 | 0.62 | 1.56 | | |
| | 3 | 0.88 | -1.12 | 0.44 | 1.49 | | |
| 5 | 1 | 0.18 | -0.92 | 0.05 | 0.94 | 1.24 | 0.26 |
| | 2 | 0.67 | -0.99 | 0.74 | 1.41 | | |
| | 3 | 0.53 | -1.00 | 0.80 | 1.38 | | |
| 7.5 | 1 | 0.68 | -0.87 | 0.52 | 1.22 | 1.24 | 0.11 |
| | 2 | 0.53 | -0.83 | 0.57 | 1.14 | | |
| | 3 | 0.68 | -0.85 | 0.82 | 1.36 | | |
| 10 | 1 | 0.79 | -1.06 | 0.47 | 1.40 | 1.39 | 0.16 |
| | 2 | 0.91 | -1.07 | 0.63 | 1.54 | | |
| | 3 | 0.58 | -1.07 | 0.17 | 1.23 | | |
| 12.5 | 1 | 0.91 | -0.99 | 0.37 | 1.40 | 1.39 | 0.09 |
| | 2 | 1.02 | -0.95 | 0.50 | 1.48 | | |
| | 3 | 0.85 | -0.89 | 0.40 | 1.30 | | |
| 15 | 1 | 0.92 | -1.00 | 0.00 | 1.36 | 1.33 | 0.15 |
| | 2 | 0.36 | -1.09 | 0.19 | 1.17 | | |
| | 3 | 0.89 | -1.12 | -0.32 | 1.47 | | |
| 17.5 | 1 | 0.49 | -0.92 | -0.45 | 1.14 | 1.16 | 0.12 |
| | 2 | 0.72 | -0.94 | -0.52 | 1.29 | | |
| | 3 | 0.72 | -0.74 | -0.19 | 1.05 | | |
| 20 | 1 | 0.59 | -1.13 | -0.02 | 1.28 | 1.29 | 0.12 |
| | 2 | 0.88 | -1.08 | -0.17 | 1.41 | | |
| | 3 | 0.75 | -0.77 | 0.45 | 1.17 | | |

ตารางที่ ค4 ค่าสีของผ้าเอี๋มอะรามิดประกบผ้าเอี๋มอะรามิดดัดแปรที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | ΔE^* | ΔE^* เฉลี่ย | S.D. |
|----------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|------|
| 1 | 1 | 0.64 | -0.01 | 1.48 | 1.61 | 1.67 | 0.13 |
| | 2 | 0.77 | -0.05 | 1.37 | 1.58 | | |
| | 3 | 0.84 | -0.08 | 1.61 | 1.82 | | |
| 2.5 | 1 | 0.64 | -0.16 | 0.92 | 1.14 | 1.21 | 0.25 |
| | 2 | 0.77 | -0.22 | 1.25 | 1.49 | | |
| | 3 | 0.80 | -0.15 | 0.59 | 1.00 | | |
| 5 | 1 | 0.36 | -0.16 | 1.17 | 1.24 | 1.35 | 0.14 |
| | 2 | 0.67 | -0.37 | 1.29 | 1.50 | | |
| | 3 | 1.01 | -0.41 | 0.71 | 1.30 | | |
| 7.5 | 1 | 0.66 | -0.35 | 0.82 | 1.11 | 1.06 | 0.12 |
| | 2 | 0.74 | -0.34 | 0.81 | 1.14 | | |
| | 3 | 0.56 | -0.23 | 0.70 | 0.92 | | |
| 10 | 1 | 0.27 | -0.23 | 0.62 | 0.72 | 0.89 | 0.16 |
| | 2 | 0.47 | -0.25 | 0.87 | 1.02 | | |
| | 3 | 0.76 | -0.45 | 0.34 | 0.94 | | |
| 12.5 | 1 | 0.00 | -0.45 | 0.78 | 0.90 | 1.40 | 0.58 |
| | 2 | 0.52 | -0.51 | 1.89 | 2.03 | | |
| | 3 | 0.57 | -0.65 | 0.91 | 1.26 | | |
| 15 | 1 | 0.22 | -0.49 | 0.91 | 1.06 | 1.09 | 0.07 |
| | 2 | 0.77 | -0.40 | 0.78 | 1.17 | | |
| | 3 | 0.46 | -0.43 | 0.83 | 1.04 | | |
| 17.5 | 1 | 0.45 | -0.14 | 0.42 | 0.63 | 0.66 | 0.06 |
| | 2 | 0.59 | -0.28 | 0.33 | 0.73 | | |
| | 3 | 0.22 | 0.02 | 0.59 | 0.63 | | |
| 20 | 1 | 0.60 | -0.46 | 0.80 | 1.10 | 1.40 | 0.27 |
| | 2 | 0.86 | -0.40 | 1.12 | 1.47 | | |
| | 3 | 1.49 | -0.57 | 0.35 | 1.63 | | |

ตารางที่ ค5 ค่าสีของผ้าฝ้ายประกบผ้าเอี๊ยมอะรามิดที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | ΔE^* | ΔE^* เฉลี่ย | S.D. |
|----------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|------|
| 1 | 1 | -0.08 | 0.19 | -0.86 | 0.88 | 0.80 | 0.07 |
| | 2 | 0.19 | 0.16 | -0.71 | 0.75 | | |
| | 3 | -0.03 | 0.15 | -0.74 | 0.76 | | |
| 2.5 | 1 | 0.04 | 0.31 | -1.24 | 1.28 | 1.23 | 0.05 |
| | 2 | -0.05 | 0.29 | -1.19 | 1.22 | | |
| | 3 | 0.13 | 0.30 | -1.14 | 1.19 | | |
| 5 | 1 | 0.13 | 0.26 | -1.04 | 1.08 | 0.68 | 0.35 |
| | 2 | 0.11 | 0.10 | -0.55 | 0.57 | | |
| | 3 | 0.24 | 0.06 | -0.31 | 0.40 | | |
| 7.5 | 1 | -0.03 | 0.20 | -0.86 | 0.89 | 0.90 | 0.05 |
| | 2 | 0.12 | 0.18 | -0.82 | 0.85 | | |
| | 3 | 0.17 | 0.19 | -0.91 | 0.95 | | |
| 10 | 1 | 0.13 | 0.33 | -1.18 | 1.23 | 1.27 | 0.04 |
| | 2 | -0.38 | 0.30 | -1.20 | 1.30 | | |
| | 3 | -0.06 | 0.33 | -1.25 | 1.29 | | |
| 12.5 | 1 | -0.31 | 0.27 | -0.88 | 0.97 | 1.20 | 0.36 |
| | 2 | -1.31 | 0.20 | -0.91 | 1.61 | | |
| | 3 | -0.14 | 0.28 | -0.97 | 1.01 | | |
| 15 | 1 | -0.37 | 0.33 | -1.05 | 1.16 | 1.16 | 0.01 |
| | 2 | -0.09 | 0.33 | -1.10 | 1.15 | | |
| | 3 | -0.11 | 0.31 | -1.12 | 1.16 | | |
| 17.5 | 1 | -0.19 | 0.12 | -0.68 | 0.72 | 0.78 | 0.20 |
| | 2 | -0.11 | 0.19 | -0.97 | 1.00 | | |
| | 3 | -0.04 | 0.12 | -0.60 | 0.61 | | |
| 20 | 1 | 0.29 | 0.23 | -0.84 | 0.92 | 0.91 | 0.04 |
| | 2 | -0.22 | 0.31 | -0.86 | 0.94 | | |
| | 3 | 0.29 | 0.27 | -0.76 | 0.87 | | |

ตารางที่ ค6 ค่าสีของผ้าฝ้ายประกบผ้าเอมอะรามิดดัดแปรที่เคลือบพอลิอะนิลีน

| ความเข้มข้น อะนิลีน (%) | แผ่นที่ | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | ΔE^* | ΔE^* เฉลี่ย | S.D. |
|----------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|------|
| 1 | 1 | 0.21 | 0.21 | -0.99 | 1.03 | 1.03 | 0.05 |
| | 2 | -0.49 | 0.15 | -0.95 | 1.08 | | |
| | 3 | -0.08 | 0.29 | -0.94 | 0.98 | | |
| 2.5 | 1 | -0.01 | 0.28 | -0.99 | 1.02 | 1.07 | 0.04 |
| | 2 | 0.21 | 0.26 | -1.05 | 1.10 | | |
| | 3 | 0.16 | 0.28 | -1.03 | 1.09 | | |
| 5 | 1 | 0.12 | 0.20 | -0.68 | 0.72 | 0.67 | 0.17 |
| | 2 | -0.01 | 0.21 | -0.75 | 0.48 | | |
| | 3 | 0.09 | 0.24 | -0.78 | 0.82 | | |
| 7.5 | 1 | -0.02 | 0.22 | -0.88 | 0.91 | 0.68 | 0.20 |
| | 2 | 0.00 | 0.18 | -0.51 | 0.54 | | |
| | 3 | 0.06 | 0.21 | -0.55 | 0.60 | | |
| 10 | 1 | 0.05 | 0.16 | -0.52 | 0.55 | 0.62 | 0.06 |
| | 2 | -0.06 | 0.18 | -0.63 | 0.66 | | |
| | 3 | -0.21 | 0.16 | -0.58 | 0.64 | | |
| 12.5 | 1 | -0.53 | 0.11 | -0.24 | 0.59 | 0.70 | 0.18 |
| | 2 | -0.36 | 0.20 | -0.44 | 0.61 | | |
| | 3 | -0.21 | 0.18 | -0.87 | 0.91 | | |
| 15 | 1 | 0.07 | 0.17 | -0.66 | 0.69 | 0.75 | 0.06 |
| | 2 | 0.05 | 0.17 | -0.77 | 0.79 | | |
| | 3 | -0.01 | 0.17 | -0.76 | 0.78 | | |
| 17.5 | 1 | -0.44 | 0.27 | -0.75 | 0.91 | 0.77 | 0.20 |
| | 2 | -0.32 | 0.24 | -0.74 | 0.85 | | |
| | 3 | -0.33 | 0.21 | -0.36 | 0.54 | | |
| 20 | 1 | -0.03 | 0.25 | -0.58 | 0.63 | 0.82 | 0.17 |
| | 2 | -0.67 | 0.27 | -0.64 | 0.97 | | |
| | 3 | -0.76 | 0.16 | -0.36 | 0.85 | | |

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ-สกุล | สิรภพ ถาวร |
| วัน เดือน ปี เกิด | 3 กรกฎาคม 2536 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดนครราชสีมา |
| วุฒิการศึกษา | ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 153/9 ม.4 ต.ไชยมงคล อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 |
| ผลงานตีพิมพ์ | The 25th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 30 พฤษภาคม 2562 ในหัวข้อ Development of Electromagnetic interference (EMI) Shielding Fabrics |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY