



ผลของสีย้อมอนินทรีย์ที่มีต่อการควบคุมประจุไฟฟ้า และประสิทธิภาพการส่งออกทาง
ไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน
Effects of inorganic dyes on the charge controlling and output
efficiency of the cotton-based triboelectric nanogenerator

นางสาว สิริพร หู
นางสาว สุชานาถ นวตระกูลพิศิษฐ์
นาย ภูมิกรินทร์ นิลละอ

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2564



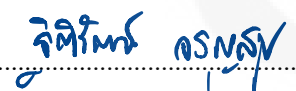
ผลของสีย้อมอนินทรีย์ที่มีต่อการควบคุมประจุไฟฟ้า และประสิทธิภาพการส่งออกจาก
ไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน
Effects of inorganic dyes on the charge controlling and output
efficiency of the cotton-based triboelectric nanogenerator

นางสาว สิริพร หู
นางสาว สุชานาถ นวตระกูลพิสิษฐ์
นาย ภูมิกรินทร์ นิลละอ

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2564

ชื่อเรื่อง	ผลของสีย้อมอนินทรีย์ที่มีต่อการควบคุมประจุไฟฟ้า และประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน Effects of inorganic dyes on the charge controlling and output efficiency of the cotton-based triboelectric nanogenerator
ผู้วิจัย	นางสาวสิริพร หวู นางสาวสุชานาถ นวตระกูลพิสิษฐ์ นายภูมิกรินทร์ นิลละอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฐิติรัตน์ จรุงสุข

โครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ฐิติรัตน์ จรุงสุข)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย และวัตถุประสงค์ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องมาจากความกรุณาในการให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และการช่วยเหลือ รวมถึงการสนับสนุน จากทุก ๆ ท่าน และหน่วยงานวิจัยต่าง ๆ อย่างดียิ่ง ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ฐิติรัตน์ จรุงสุข อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยนี้ ที่คอยให้ความรู้ ความเข้าใจ และคำแนะนำ พร้อมทั้งความช่วยเหลือในการปรับปรุงแก้ไขโครงการวิจัยในส่วนที่บกพร่องให้มี ความสมบูรณ์ และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และคอยพัฒนาศักยภาพของคณะผู้วิจัยเอง ให้มีความรู้ ความสามารถ ในกระบวนการคิด และแก้ปัญหา รวมถึงให้ข้อคิด คุณธรรม จริยธรรม ซึ่งคณะผู้วิจัย สามารถนำสิ่งเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในการศึกษา และการทำงานในอนาคต จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำ คำติชม และการสนับสนุน รวมถึงคอยให้กำลังใจคณะผู้วิจัย ให้สามารถทำโครงการวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.นราธิป วิทยากร และดร.สธน ผ่องอำไพ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวิจัย และการทำต้นแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ให้สามารถทำโครงการวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ นักวิจัยทุกท่าน ผู้ให้การสนับสนุน และความร่วมมือทางการวิจัย จากสถาบันวิจัยต่าง ๆ ให้คณะผู้วิจัยสามารถทำโครงการวิจัยได้อย่างสำเร็จ และสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และทุนสนับสนุนงานวิจัย งบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2564

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุน และผลักดันในการศึกษาเล่าเรียน พร้อมทั้งคอยสั่งสอน และให้กำลังใจเสมอมา ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งเพื่อน ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมาในข้างต้น คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

นางสาวสิริพร หวู

นางสาวสุชานาถ นวตระกูลพิสิษฐ์

นายภูมิกรินทร์ นิลละออ

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของสีย้อมอนินทรีย์ที่มีต่อการควบคุมประจุไฟฟ้า และประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน	
ชื่อนักศึกษา	สิริพร หวู	61102010018
	สุชานาถ นวตระกูลพิสิษฐ์	61102010020
	ภูมิกรินทร์ นิลละอ	61102010295
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วัสดุศาสตร์)	
ปีการศึกษา	2564	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ฐิติรัตน์ จรุงสุข	

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ (electronic textiles; E-textiles) ได้รับความสนใจอย่างมาก และมีแนวโน้มที่จะพัฒนาเพิ่มขึ้นในอนาคต งานวิจัยนี้จึงพัฒนาอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (triboelectric nanogenerator; TENG) ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลจากการสัมผัสให้เป็นไฟฟ้าสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสิ่งทอ ด้วยการใช้ผ้าคอตตอน (cotton) เป็นวัสดุสัมผัสหลัก และใช้ผ้าเคลือบด้วยท่อนาโนคาร์บอน (CNT) เป็นขั้วไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น โดยได้ทำการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันของชั้นสัมผัสหลักคอตตอนด้วยสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ สีรีแอกทีฟ สีไโดเรกซ์ และสีเบสิก ทำการตรวจสอบและยืนยันหมู่ฟังก์ชันได้ด้วยเทคนิค IR จากนั้นเมื่อศึกษาผลของสีย้อมที่ส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริก พบว่า ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีทั้ง 3 ชนิดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าผ้าคอตตอน 2 เท่า และเมื่อทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า พบว่า สีรีแอกทีฟ ให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่สูงกว่าสีเบสิกและสีไโดเรกซ์ โดยผ้าที่ย้อมสีรีแอกทีฟสีน้ำเงินแสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าสูงที่สุดจากสีย้อมทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากปรากฏหมู่ฟังก์ชันและอะตอมโลหะที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี โดยสามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ ~ 32.73 V, ~ 36.6 nA และ ~ 243 μ W ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าผ้าคอตตอน 2.2 เท่า งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า หมู่ฟังก์ชันของสีย้อมส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริก และมีบทบาทสำคัญในการควบคุมค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของผ้าคอตตอน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสามารถนำ TENG จากผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีมาประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดหลอดไฟ LED ขนาดใหญ่ ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนากลุ่มอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ใช้ร่วมกับอุตสาหกรรมสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ : อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก, สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์, ผ้าคอตตอน, หมู่ฟังก์ชัน, สีย้อม

Title	Effects of inorganic dyes on the charge controlling and output efficiency of the cotton-based triboelectric nanogenerator	
Students	Siriporn Wu	61102010018
	Suchanat Navatragulpisit	61102010020
	Phumkarin Ninlaor	61102010295
Degree	Bachelor of Science (Materials Science)	
Academic Year	2021	
Advisor	Dr. Thitirat Charoonsuk	

Abstract

Nowadays, the electronic textiles (E-textiles) have gained much attention and tend to be more developed in future. The attention of this work is to develop the triboelectric nanogenerator (TENG) that can convert mechanical energy from friction and transform into electricity for driving electronic components in textile. The cotton fabric is used as the main friction material and the fabric/CNT composite is used as flexible electrode. Modifying various functional groups of cotton by three types of dyes i.e., reactive, direct, and basic dyes is studied. The functional groups of each samples can be identified by infrared spectroscopy. The effect of each dyes on dielectric constant is studied. It was found that the dielectric constant of all fabric/dyes is higher than that of the pure cotton for 2 times. According to the electrical output measurement, cotton/reactive dyes shows higher electrical output than those of cotton/basic and cotton/direct dyes. The cotton/reactive blue dyes obviously shows the best output efficiency because of high electron donor ability from its functional group and metal atom. This condition can provide the maximum output voltage (V_{oc}), output current (I_{sc}) and output power (P_{max}) at ~ 32.73 V, ~ 36.6 nA and ~ 243 μ W, respectively. That is higher than pure cotton for 2.2 times. It was concluded that the functional group is a crucial role to control the output efficiency. Moreover, this work also apply the cotton/dyes TENG to be electronic sensor for operate the LED light-bulb. The authors expect that this research will be useful for the development of energy harvesting devices for utilizing in E-textiles industry in future.

Keywords : Triboelectric nanogenerator, E-textiles, Cotton fabric, Functional groups, Dyes

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing; IoT)	5
2.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กชนิดพกพา และสวมใส่ได้ (Wearable devices).....	6
2.3 สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Textiles; E-Textiles).....	9
2.4 เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting Technology)	11
2.4.1 พลังงานจากน้ำ (Hydropower)	11
2.4.2 พลังงานจากลม (Wind Energy).....	12
2.4.3 พลังงานจากแสงอาทิตย์ (Solar Energy).....	13
2.4.4 พลังงานความร้อนจากใต้พิภพ (Geothermal Energy).....	14
2.4.5 พลังงานจากชีวมวล (Biomass)	14
2.4.6 พลังงานเชิงกล (Mechanical Energy).....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator; TENG)	15
2.5.1 โครงสร้างของ TENG.....	16
2.5.1.1 Contact-separation mode	16
2.5.1.2 Lateral-sliding mode.....	16
2.5.1.3 Freestanding layer mode	16
2.5.1.4 Single-electrode mode	17
2.5.2 หลักการทำงานของ TENG.....	17
2.5.2.1 หลักการเกิดไฟฟ้าสถิต (Triboelectric effect).....	17
2.5.2.2 หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electric induction)	18
2.6 ผ้าคอตตอน (Cotton).....	19
2.6.1 สมบัติของคอตตอน.....	19
2.6.1.1 สมบัติทางกายภาพ	19
2.6.1.2 สมบัติทางเคมี.....	20
2.7 หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups).....	21
2.8 ปรากฏการณ์ Inductive Effect	32
2.9 สีย้อม (Dye).....	32
2.9.1 จำแนกตามแหล่งที่มาของสีย้อม.....	32
2.9.1.1 สีย้อมจากธรรมชาติ	32
2.9.1.2 สีย้อมสังเคราะห์	33
2.9.2 จำแนกตามการนำไปใช้ของสีย้อม	33
2.9.2.1 สีย้อมแอคทีฟ (Reactive Dye)	33
2.9.2.2 สีย้อมตรง (Direct Dye)	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.2.3 สีเบสิค (Basic Dye)	36
2.10 การย้อมสี	36
2.10.1 กลไกการดูดติด	37
2.10.1.1 Lyophobic of Solution	37
2.10.1.2 High Affinity of Solution to Solid	37
2.10.2 ขั้นตอนการย้อมผ้า	37
2.10.2.1 การเตรียมผ้า	37
2.10.2.2 การย้อมผ้า	38
2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	38
2.11.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
2.11.2 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับวัตถุ	39
2.11.2.1 สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image; SEI).....	39
2.11.2.2 สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image; BEI). 39	
2.11.2.3 สัญญาณภาพจากรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Image; XRI).....	40
2.12 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy; FTIR).....	40
2.12.1 กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด FTIR Micro-Spectrometer	40
2.12.2 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด FTIR Micro-Spectrometer	41
2.13 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)	42
2.13.1 หลักการทำงานของรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy).....	42
2.13.2 การประยุกต์ใช้งานเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์	43
2.14 เทคนิค X-ray Tomographic Microscopy (XTM)	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14.1 หลักการทำงานของ XTM	43
2.15 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	44
2.15.1 ประเภทของออสซิลโลสโคป.....	45
2.15.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	45
2.15.3 หลักการทำงานของออสซิลโลสโคป	46
2.16 เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter)	46
2.16.1 หลักการพื้นฐานของเครื่องวัดแอลซีอาร์	47
2.16.2 เทคนิคการใช้งานเครื่องวัดแอลซีอาร์	47
2.17 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM).....	48
2.17.1 ประเภทของมัลติมิเตอร์	48
2.17.2 หลักการทำงานของมัลติมิเตอร์	49
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	50
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี	50
3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์	50
3.1.2 สารเคมี	50
3.2 การเตรียมผ้าคอตตอน (Preparation of cotton fabrics).....	51
3.2.1 การลอกแป้งผ้าคอตตอนดิบ (Desizing of cotton fabrics).....	51
3.2.2 การกำจัดสิ่งสกปรกบนผ้าคอตตอน (Scouring of cotton fabrics).....	52
3.3 การเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอน (Preparation of dyes and Dyeing cotton fabrics).....	53
3.3.1 การเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีรีแอคทีฟ (Reactive dyeing process)	53
3.3.2 การเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีไดเรกต์ (Direct dyeing process)	55
3.3.3 การเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีเบสิก (Basic dyeing process)	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการทำเป็นคอมโพสิตระหว่างผ้ากาวและ CNT.....	57
3.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)	57
3.6 การประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโพรโบอิเล็กทริก (TENG).....	58
3.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และตรวจสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า.....	59
3.7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	59
3.7.2 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy; FTIR)	59
3.7.3 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)	60
3.7.4 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM)	60
3.7.5 เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter).....	60
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	62
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการย้อมสี	62
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการลอกแป้งและการกำจัดสิ่งสกปรก.....	62
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนก่อน และหลังการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ สีไทดเรกท์ และ สีเบสิค	63
4.1.2.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนก่อนการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ สีไทดเรกท์ และสีเบสิค.....	63
4.1.2.2 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ	63
4.1.2.3 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีไทดเรกท์	64
4.1.2.4 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีเบสิค	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer; SEM-EDS) ของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT และผ้าคอตตอน.....	65
4.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT	65
4.2.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT และถูกรีดติดกับผ้าคอตตอน.....	67
4.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT และถูกรีดติดกับผ้าคอตตอน	68
4.3 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าและการกระจายตัวของ CNT ในผ้ากาว ด้วยเทคนิค Synchrotron Radiation X-ray Tomographic Microscopy (SR-XTM)	70
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้ากาวที่ผ่านการชุบด้วยท่อนาโนคาร์บอน	70
4.3.2 การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในผ้ากาว.....	71
4.4 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy).....	72
4.5 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของผ้าคอตตอนทั้งก่อนและหลังการย้อมสี ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR)	74
4.5.1 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของผ้าคอตตอนก่อนการย้อมสี.....	74
4.5.2 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ สีรีแอคทีฟ สีไดเรกต์ และสีเบสิก	75
4.5.3 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีซินทรีย์แอคทีฟ	83
4.6 ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี และผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีด้วยสีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) สีไดเรกต์ (Direct dyes) และสีเบสิก (Basic dyes)	85

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.1 ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Cotton Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี	85
4.6.2 ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีไดเรกต์ (Cotton Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี	86
4.6.3 ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีเบสิก (Cotton Basic dyes) สีแดง	87
4.7 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า	88
4.7.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอนโดยเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า	88
4.7.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี ด้วยสีย้อมสีแดง (Red dyes) ชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไดเรกต์ (Direct dyes) และเบสิก (Basic dyes)	90
4.7.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี	92
4.7.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีไดเรกต์ (Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี	94
4.7.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ของผ้าคอตตอนและผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ	96

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกจากไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี แบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode)	98
4.8 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน	100
4.8.1 การประดิษฐ์เซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน	100
4.8.2 แผนภาพวงจรที่ใช้ในการทำเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	100
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	100
5.1.1 ผลการศึกษาวิธีการย้อมสีผ้าคอตตอน ด้วยสีย้อม 3 ชนิด.....	100
5.1.2 ผลการศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะของผ้าคอตตอนก่อน และหลังการย้อมสี	100
5.1.3 ผลการศึกษาและประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของขั้วไฟฟ้า.....	104
5.1.4 ผลการศึกษาผลของสีย้อมที่ส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริก และค่าการส่งออกจากไฟฟ้า คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG)	104
5.1.5 ผลการศึกษานำไปประยุกต์ใช้ (Application).....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	105
เอกสารอ้างอิง	106
ภาคผนวก.....	117
ประวัติผู้วิจัย.....	126

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ตารางการเตรียมสีรีแอคทีฟ.....	53
ตาราง 2 ตารางการเตรียมสีไดเรกต์.....	55
ตาราง 3 ตารางการเตรียมสีเบสิค.....	56
ตาราง 4 วิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ชั้นของผ้าขาวที่ชุบด้วยCNT.....	69
ตาราง 5 วิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ชั้นของผ้าคอตตอน.....	69
ตาราง 6 แสดงช่วงของการดูดกลืน รูปแบบการสั่น และพันธะของผ้าคอตตอน.....	74



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 2.1 การประยุกต์ใช้ IoT ในด้านต่าง ๆ.....	6
ภาพประกอบ 2.2 แสดงตัวอย่างของ Wearable device.....	7
ภาพประกอบ 2.3 แสดงกราฟการคาดการณ์การเติบโตของตลาด Wearable devices.....	7
ภาพประกอบ 2.4 แสดงวิวัฒนาการของ Wearable device.....	8
ภาพประกอบ 2.5 แสดง Wearable devices ทางด้านการแพทย์และสุขภาพที่สามารถสวมใส่กับส่วน ต่างๆของร่างกาย.....	9
ภาพประกอบ 2.6 สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic textiles).....	10
ภาพประกอบ 2.7 โรงไฟฟ้าพลังน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Reservoir).....	12
ภาพประกอบ 2.8 เทคโนโลยีกักเก็บลม.....	13
ภาพประกอบ 2.9 เซลล์แสงอาทิตย์ หรือโซลาร์เซลล์ (Solar cell).....	13
ภาพประกอบ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุ 2 ชนิดสัมผัสกัน.....	15
ภาพประกอบ 2.11 โครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก.....	16
ภาพประกอบ 2.12 โครงสร้าง TENG 4 แบบ.....	17
ภาพประกอบ 2.13 ตาราง Triboelectric series.....	18
ภาพประกอบ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของผ้าคอตตอน (Cotton).....	20
ภาพประกอบ 2.15 แสดงกราฟ World fiber production.....	20
ภาพประกอบ 2.16 โครงสร้างของแอลกอฮอล์ (Alcohol).....	21
ภาพประกอบ 2.17 โครงสร้างของประเภทยีเทอร์ (Ethers).....	22
ภาพประกอบ 2.18 โครงสร้างของแอลดีไฮด์ (Aldehyde).....	22
ภาพประกอบ 2.19 โครงสร้างของคีโตน (Ketone).....	23
ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างของกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid).....	23
ภาพประกอบ 2.21 โครงสร้างของเอมีน (Amine).....	24
ภาพประกอบ 2.22 แสดงกราฟ FTIR ของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (แถวบนสุด), Nitro-CNF (แถวกลาง) และ Methyl-CNF (แถวล่าง), แสดงกราฟค่ากระแสไฟฟ้า (Output current) และค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage), ภาพถ่ายแสดงฟิล์มใสที่ประดิษฐ์จากเส้นใยนาโนเซลลูโลสทั้งสามชนิด.....	25

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 2.23 กลไกการสังเคราะห์ของการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันอัลลิซิน (Allicin) ลงบน เส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanofiber).....	26
ภาพประกอบ 2.24 (a) แสดงค่ากระแสไฟฟ้า (Output current) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanofiber) ก่อนและหลังการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชัน, (b) และ (c) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลส Cellulose Nanofiber) ก่อนและหลัง การปรับปรุงหมู่ฟังก์ชัน และ (d) แสดงรูปกลไกการทำงานของ TENG.....	27
ภาพประกอบ 2.25 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม A-CNF.....	28
ภาพประกอบ 2.26 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม PFOTES-CNF.....	29
ภาพประกอบ 2.27 กลไกการทำงานของ TENG ที่ใช้ฟิล์ม PFOTES-CNF.....	30
ภาพประกอบ 2.28 แสดงภาพปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชัน (Phosphorylation) และปฏิกิริยา ซัลโฟเนชัน (Sulfonation) บนแบคทีเรียเซลลูโลส (Bacterial cellulose; BC).....	31
ภาพประกอบ 2.29 แนวโน้มการให้และดึงดูดอิเล็กตรอนของอะตอมต่างๆ.....	32
ภาพประกอบ 2.30 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟ (Reactive dye).....	34
ภาพประกอบ 2.31 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสีไดเรกต์ (Direct dye).....	35
ภาพประกอบ 2.32 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสีเบสิก (Basic dye).....	36
ภาพประกอบ 2.33 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)	39
ภาพประกอบ 2.34 กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด FTIR Micro-Spectrometer.....	41
ภาพประกอบ 2.35 เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy).....	42
ภาพประกอบ 2.36 เครื่อง X-ray Tomographic Microscopy.....	44
ภาพประกอบ 2.37 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	44
ภาพประกอบ 2.38 ออสซิลโลสโคปแบบอะนาล็อก (Analog oscilloscope).....	45
ภาพประกอบ 2.39 ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล (Digital oscilloscope).....	45
ภาพประกอบ 2.40 เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter).....	47
ภาพประกอบ 2.41 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM).....	48
ภาพประกอบ 2.42 มัลติมิเตอร์แบบอะนาล็อก (Analog multimeter).....	48

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 2.43 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล (Digital multimeter).....	49
ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนการลอกแบ่งผ้าคอตตอนดิบ.....	52
ภาพประกอบ 3.2 ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกบนผ้าคอตตอน.....	53
ภาพประกอบ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีรีแอคทีฟ.....	54
ภาพประกอบ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีไดเรกต์.....	55
ภาพประกอบ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีเบสิก.....	56
ภาพประกอบ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมขี้ไฟฟ้าโดยการทำเป็นคอมโพสิตระหว่างผ้ากาและ CNT.....	57
ภาพประกอบ 3.7 ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมเพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	58
ภาพประกอบ 3.8 โครงสร้าง และส่วนประกอบของ TENG.....	59
ภาพประกอบ 3.9 การเตรียมชิ้นงานผ้าคอตตอนเพื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิค FTIR.....	60
ภาพประกอบ 3.10 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับนำไปทดสอบ และวัดค่าไดอิเล็กทริก.....	61
ภาพประกอบ 3.11 ชิ้นงานสำหรับนำไปทดสอบ และวัดค่าไดอิเล็กทริก.....	61
ภาพประกอบ 4.1 (a) ผ้าคอตตอนดิบก่อนการลอกแบ่ง และ(b) ผ้าคอตตอนหลังการกำจัดสิ่งสกปรก.....	62
ภาพประกอบ 4.2 ผ้าคอตตอนก่อนการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ สีไดเรกต์ และสีเบสิก.....	63
ภาพประกอบ 4.3 ผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ.....	64
ภาพประกอบ 4.4 ผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีไดเรกต์.....	64
ภาพประกอบ 4.5 ผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีเบสิก.....	65
ภาพประกอบ 4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้ากาที่ชุบด้วย CNT (a) ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 300 เท่า.....	66
ภาพประกอบ 4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ CNT ที่เกาะตัว อยู่บนผ้ากา (a) ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า, (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า และ (d) ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า.....	66
ภาพประกอบ 4.8 ภาพประกอบที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของผ้ากาที่ชุบด้วย CNT และผ้าคอตตอน (a) ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 300 เท่า.....	67

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 4.9 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ CNT ที่กระจายตัวอยู่บนผ้าขาว (a) ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า, (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า และ (d) ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า.....	68
ภาพประกอบ 4.10 (a) ชั้นของผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT (Spectrum 1 บริเวณที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS) (b) องค์ประกอบทางเคมีของผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT (c) ชั้นของผ้าคอตตอน (Spectrum 2 บริเวณที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS) และ (d) องค์ประกอบทางเคมีของผ้าคอตตอน.....	69
ภาพประกอบ 4.11 (a) ผ้าขาวด้านที่ไม่มีกาว (b) ผ้าขาวด้านมีกาว และ(c) ภาพหมุน 90 องศาของผ้าขาว.....	71
ภาพประกอบ 4.12 (a) เฟสผสม (Matrix phase) (b) เฟสกระจาย (Disperse phase) และ (c) เฟสหลัก (Matrix phase)	72
ภาพประกอบ 4.13 (a) สเปกตรัมรามานของ CNT (b) สเปกตรัมรามานของผ้าคอตตอนที่ย้ายจากภาพประกอบ 4.13 (a) ที่ช่วง $1400 - 1000 \text{ cm}^{-1}$	73
ภาพประกอบ 4.14 รูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าคอตตอน.....	75
ภาพประกอบ 4.54 รูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมรีแอคทีฟ.....	80
ภาพประกอบ 4.16 รูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมไดเรกต์.....	83
ภาพประกอบ 4.17 แสดงรูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ.....	84
ภาพประกอบ 4.18 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Cotton Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี คือ สีน้าเงิน, สีน้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง.....	86

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 4.19 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีรีแอคทีฟ (Cotton Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี คือ สีนํ้าเงิน, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง.....	87
ภาพประกอบ 4.20 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีเบสิก (Cotton Basic dyes) สีแดง.....	88
ภาพประกอบ 4.21 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ของผ้าคอตตอน โดยเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า (Electrode) 4 ชนิด คือ เทปอะลูมิเนียม (Aluminum tape), ผ้าคาร์บอนนาโนทิว (CNT electrode), ผ้ากราฟีน (Graphene electrode) และผ้ากราฟีนเคลือบด้วยกราฟีน (Graphene spray electrode).....	89
ภาพประกอบ 4.22 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน โดยเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า (Electrode) 4 ชนิด คือ เทปอะลูมิเนียม (Aluminum tape), ผ้าคาร์บอนนาโนทิว (CNT electrode), ผ้ากราฟีน (Graphene electrode) และผ้ากราฟีนเคลือบด้วยกราฟีน (Graphene spray electrode).....	89
ภาพประกอบ 4.23 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) โดยเปรียบเทียบระหว่างผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี กับผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีแดง (Red dyes) ของสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไดเรกต์ (Direct dyes) และเบสิก (Basic dyes).....	91

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 4.24 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) โดยเปรียบเทียบระหว่าง ผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี กับผ้าคอตตอนที่มีการย้อมสีด้วยสีแดง (Red dyes) ของสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไโดเรกท์ (Direct dyes) และเบสิค (Basic dyes).....	91
ภาพประกอบ 4.25 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีน้ำเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง.....	92
ภาพประกอบ 4.26 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีน้ำเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง.....	93
ภาพประกอบ 4.27 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยไโดเรกท์ (Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี ได้แก่ สีน้ำเงิน, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง.....	94
ภาพประกอบ 4.28 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยไโดเรกท์ (Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี ได้แก่ สีน้ำเงิน, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง.....	95
ภาพประกอบ 4.29 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ของผ้าคอตตอน.....	97
ภาพประกอบ 4.30 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ของผ้าคอตตอนทีผ่าน การย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟสีน้ำเงิน.....	97
ภาพประกอบ 4.31 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ของผ้าคอตตอนทีผ่านการ ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟสีเหลือง.....	98
ภาพประกอบ 4.32 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีน้ำเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง แบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode).....	99

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 4.33 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง แบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode).....	99
ภาพประกอบ 4.34 อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการต่อวงจรเพื่อทำเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	101
ภาพประกอบ 4.35 เซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	101
ภาพประกอบ 4.36 แผนภาพระบบวงจรที่ใช้ทำเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย/ปัญหา

ในยุคปัจจุบัน ความสะดวกสบายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ส่งผลให้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [1] ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กชนิดพกพาและสวมใส่ได้ (Wearable devices) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หนึ่งในกลุ่มที่ได้รับความสนใจและมีแนวโน้มที่จะพัฒนาอย่างต่อเนื่อง คือ สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic textiles; E-textiles) [2] ที่เกิดจากการผสมผสานระหว่างอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุปกรณ์การตรวจจับสัญญาณ (Sensor) และอุปกรณ์การตอบสนอง (Actuator) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องมีพลังงานในการขับเคลื่อน โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ซึ่งการใช้งาน แบตเตอรี่ยังคงมีข้อจำกัด เช่น การต้องอัดประจุซ้ำ ทำให้มีอายุการใช้งานสั้น ส่งผลให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ นอกจากนี้ การมีขนาดที่ใหญ่ยังทำให้เกิดข้อจำกัดในการลดขนาดของอุปกรณ์ และการมีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน ดังนั้น การใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเข้ามาทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ด้วยการคิดค้นเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการนำพลังงานจากสิ่งแวดล้อมมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งาน เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ [3] พลังงานจากน้ำ [4] และพลังงานลม [5] จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่เนื่องจากพลังงานเหล่านี้มีข้อจำกัดทางธรรมชาติในการเก็บเกี่ยว เช่น ช่วงเวลา และสภาพอากาศ ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ในปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานทางเลือกบนพื้นฐานการเปลี่ยนพลังงานกลจากการสัมผัสและการเคลื่อนไหวร่างกายของมนุษย์ ซึ่งสามารถลดข้อจำกัดในการเก็บเกี่ยวพลังงาน เนื่องจากสามารถเก็บเกี่ยวได้ทุกช่วงเวลาที่ต้องการ ทำให้พลังงานเชิงกลเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพ เหมาะกับการพัฒนาในอุตสาหกรรมสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์

งานวิจัยนี้ จึงสนใจพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลจากการสัมผัสเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เรียกว่า อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator; TENG) ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรก ในปี 2012 โดยศาสตราจารย์ Wang และ คณะ [6] โดย TENG ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดที่มีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนแตกต่างกันวางประกบกัน โดยด้านหลังของวัสดุมีชั้นโลหะที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า เมื่อวัสดุเกิดการเสียดสีหรือสัมผัสกัน จะเกิดประจุไฟฟ้าขั้วตรงข้ามขึ้นที่ผิวของทั้งสองวัสดุ เมื่อวัสดุแยกออกจากกัน จะเกิดการเหนี่ยวนำให้

ประจุที่ขั้วโลหะ มีประจุตรงข้ามกับสภาพประจุที่ผิวของวัสดุ ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าออกไปสู่วงจรไฟฟ้าภายนอกผ่านขั้วไฟฟ้า [7] โดยจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก TENG นั้นเพียงพอสำหรับขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า วัสดุทั้งพอลิเมอร์ เซรามิก และโลหะสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ TENG ได้โดยวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์นั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถพัฒนาให้มีความยืดหยุ่นสูงเพื่อใช้งานอุปกรณ์ได้หลากหลาย โดยเฉพาะเสื้อผ้า เครื่องสวมใส่ รวมถึงใช้งานกับการขยับร่างกายของมนุษย์ ในปัจจุบันจึงมีการใช้อุปกรณ์ TENG ร่วมกับสิ่งทอ (Textiles) และมีแนวโน้มที่จะพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต

โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา ในปี 2019 Jeong และ คณะ [8] ได้มีการนำผ้าคอตตอน (Cotton) ที่มียีนประกอบหลัก คือ เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fibers) มาประยุกต์ใช้งานเป็นชั้นสัมผัสใน TENG พบว่า แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) 1.59 V แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่ได้จากผ้าคอตตอนนี้ไม่สูงมากนัก ทำให้นักวิจัยให้ความสนใจไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุกลุ่มผ้าและเส้นใย โดยการทำเป็นคอมโพสิตหรือการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น วิธี Surface functionalization ด้วยกระบวนการ Phosphorylation ที่เป็นการนำกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และ Sulfonation ที่เป็นการนำกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) มาเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของวัสดุ ให้เป็นหมู่ฟอสฟอริล (Phosphoryl group) และ หมู่ซัลโฟนิค (Sulfonic group) ซึ่งสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุจาก 54.4 V ไปเป็น 76.7 V และจาก 54.4 V ไปเป็น 64 V ตามลำดับ [9] วิธี Surface modification เพื่อเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุให้มีสภาพการเกิดขั้วด้วยหมู่อะมิโน (Amino group) โดยสามารถเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุจาก 159 V ไปเป็น 195 V [10]

และยังมีวิธี Chemical functionalization โดยจากงานวิจัยของ Roy และ คณะ [11] ได้มีการใช้สารอัลลิซิน (Allicin) ที่สกัดได้จากน้ำกระเทียม มาปรับปรุงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติไทรโบอิเล็กทริกให้กับเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanofiber) เพื่อให้หมู่ฟังก์ชันซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide groups) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของอัลลิซินไปติดบนเส้นใยนาโนเซลลูโลส โดยในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 7.9 V และค่ากระแสไฟฟ้า (Output current) สูงสุดที่ 5.13 μA และจากงานวิจัยของ Nie และคณะ [12] ที่มีการนำ Triethoxy-1H,1H,2H,2H-tridecafluoro-n-octylsilane (PFOTES) มาปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส เพื่อให้หมู่ฟังก์ชันซิลีนอล (Silanol groups) ไปติดบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส โดยในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 28.5 V ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 9.3 μA และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density) สูงสุดที่ 1.35 $\mu W/cm^2$ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Yao และ คณะ [13] ที่มีการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส เพื่อเพิ่มความเป็นลบด้วยหมู่ไนโตร (Nitro groups) และเพิ่มความเป็นบวกด้วยหมู่

เมทิล (Methyl groups) โดยในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 8 V และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 9 μA ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันเป็นตัวแปรที่สำคัญ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุกลุ่มผ้าและเส้นใย ทำให้นักวิจัยสามารถควบคุมค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของวัสดุกลุ่มนี้ได้ด้วยการปรับปรุง (Modified) หมู่ฟังก์ชัน อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวข้างต้น เป็นวิธีที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อน มีตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเกิดหมู่ฟังก์ชันจำนวนมากที่ยากแก่การควบคุมคุณภาพ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงให้ความสนใจไปที่วิธีการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนน้อย นั่นคือ การใช้สีย้อม โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา ที่ได้มีการนำเม็ดบีดโพลีเมอร์ไปย้อมด้วยสีย้อมคูมาริน (Coumarin dyes) พบว่า เมื่อสีย้อมและเม็ดบีดโพลีเมอร์สัมผัสกัน สีย้อมจะเกิดประจุไฟฟ้าขึ้น แสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ [14] และมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุกลุ่มผ้าและเส้นใย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกจากสิ่งทอ (Textile-TENG; T-TENG)

งานวิจัยนี้ ศึกษาการนำสีย้อมมาปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันของผ้าคอตตอน เพื่อประยุกต์ใช้ใน T-TENG โดยให้ความสนใจและทำการศึกษานิดของสีย้อมที่สามารถนำมาย้อมผ้าคอตตอนได้ และพบว่า มีสีย้อม 3 ชนิด คือ สิริแอคทีฟ (Reactive dyes), สีดตรงท์ (Direct dyes) และสีเบสิก (Basic dyes) ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีหมู่ฟังก์ชันหลักคือ หมู่อะมีน (Amine) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี ส่งผลให้ผ้าคอตตอนถูกปรับปรุงให้มีความเป็นบวกสูงขึ้นได้ และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และผลของหมู่ฟังก์ชันที่ได้จากการย้อมด้วยสีย้อมแต่ละชนิด ที่มีต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก รวมทั้ง ศึกษาการส่งออกทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้า (Output power)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการย้อมสีผ้าคอตตอน (Cotton) ด้วยสีย้อม
2. เพื่อศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะของผ้าคอตตอน (Cotton) ก่อนและหลังการย้อมสี
3. เพื่อศึกษาการประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG)
4. เพื่อศึกษาผลของสีย้อมที่ส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริก และค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กชนิดโทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการย้อมสีผ้าคอตตอนด้วยสีย้อมชนิด รีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไตรเรกต์ (Direct dyes) และเบสิก (Basic dyes)
2. ศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะของผ้าคอตตอน โดยการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ก่อนและหลังการย้อมสี
3. ประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอีเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของขั้วไฟฟ้า
4. ศึกษาผลของสีย้อมที่ส่งผลต่อค่าไดโวลีทริก และค่าการส่งออกจากไฟฟ้า คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้า (Output power) ของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอีเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ผ้าคอตตอน ที่ผ่านการย้อมสีด้วยสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไตรเรกต์ (Direct dyes), และเบสิก (Basic dyes)
2. ได้ทราบเอกลักษณ์เฉพาะของผ้าคอตตอน หมู่ฟังก์ชัน และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอตตอนก่อนและหลังการย้อมสี
3. ได้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอีเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG)
4. ได้ทราบผลของสีย้อมชนิดต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าไดโวลีทริก และค่าการส่งออกจากไฟฟ้า คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้า (Output power) ของอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กชนิดโทรโบอีเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG)

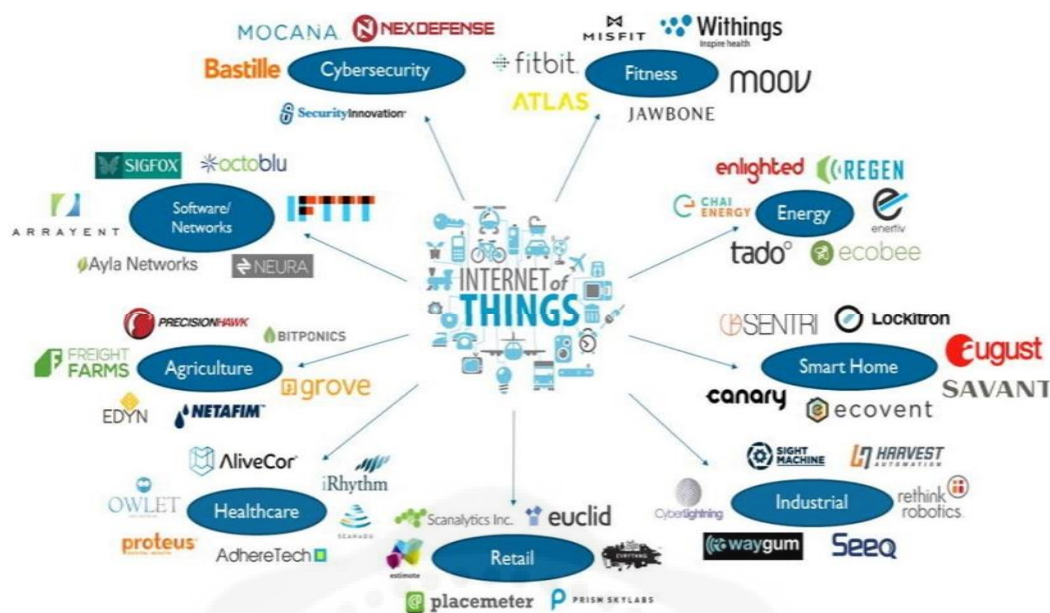
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing; IoT)

ในยุคปัจจุบัน ความสะดวกสบายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ส่งผลให้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 1999 คำว่า “Internet of Things” ได้ถูกกล่าวโดย Kevin Ashton เป็นครั้งแรก จึงเป็นจุดเริ่มต้นของ IoT ตั้งแต่นั้นมา [1] อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ IoT คือ การเชื่อมโยงถึงกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และสามารถส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้ด้วยเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งการเชื่อมโยงนี้ทำให้มนุษย์เราสามารถสั่งการหรือควบคุมการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับการใช้งานอื่นๆ ได้โดยง่าย

โดยเทคโนโลยี IoT จะมีอุปกรณ์เซนเซอร์ (Sensors) เป็นตัวช่วยในการทำงาน ซึ่งเปรียบเสมือนการเติมความคิดให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านี้ สามารถเชื่อมโยงและรับส่งข้อมูลถึงกันและกันได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยี IoT นี้ อย่างต่อเนื่อง และด้วยความสามารถของเทคโนโลยี IoT ที่สามารถเชื่อมโยงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้ส่งข้อมูลถึงกันและกันได้ รวมกับการพัฒนาของ IoT นี้ ทำให้ IoT สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายและกว้างขวาง ซึ่งสร้างประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน ตัวอย่างเช่น ด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ด้านการศึกษา ด้านการคมนาคม ด้านสุขภาพ หรือแม้กระทั่งการใช้ชีวิตประจำวัน เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1 นอกจากนี้ IoT จะสามารถส่งข้อมูลถึงกันได้แล้ว ยังสามารถตรวจจับหรือตรวจวัดข้อมูลได้ และนำข้อมูลเหล่านั้นที่มีความซับซ้อนมาวิเคราะห์ รวมถึงแสดงผลออกมาได้อย่างทันที (Real-time) จากความสามารถและการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ IoT เป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กชนิดพกพาและสวมใส่ได้ (Wearable devices) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องในอนาคต



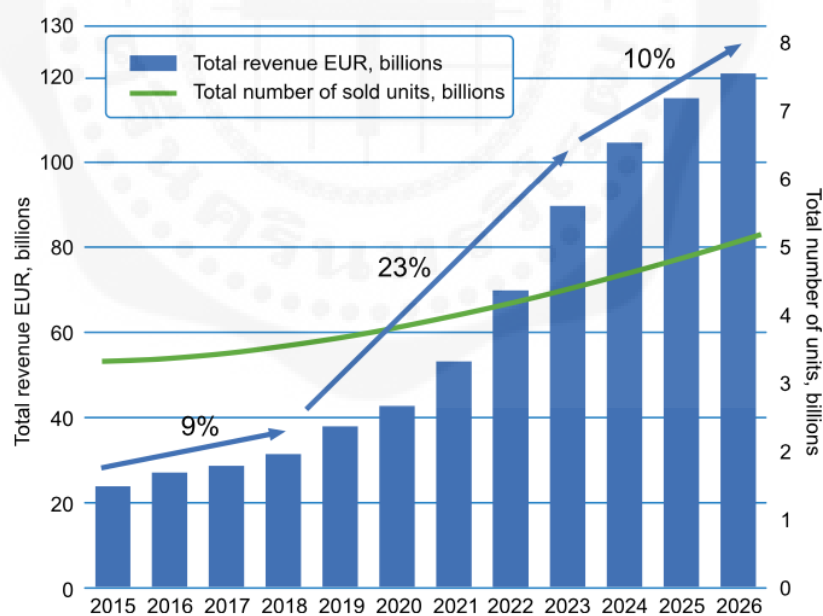
ภาพประกอบ 2.1 การประยุกต์ใช้ IoT ในด้านต่าง ๆ [1]

2.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กชนิดพกพา และสวมใส่ได้ (Wearable devices)

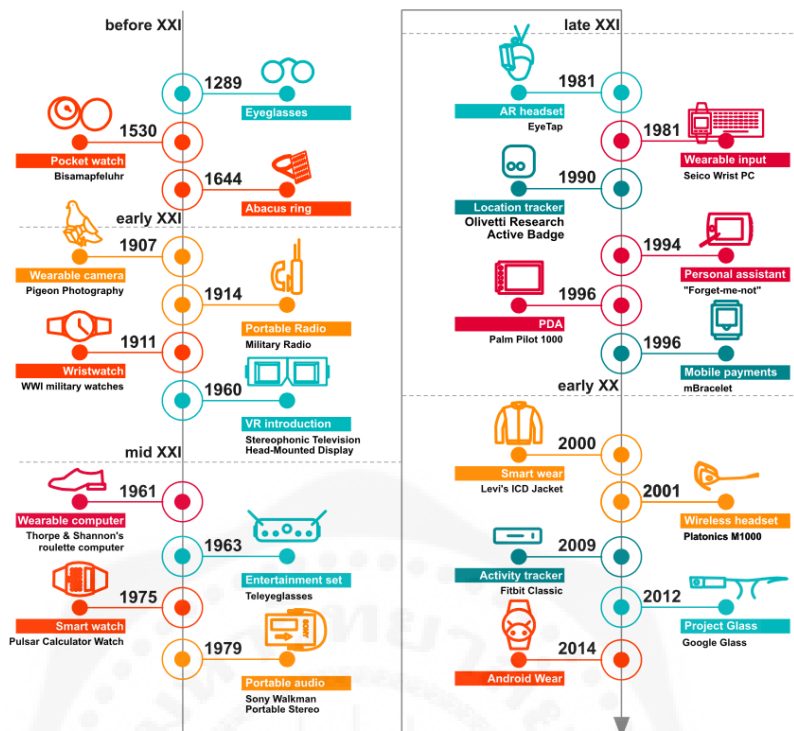
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กชนิดพกพา และสวมใส่ได้ (Wearable devices) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มนุษย์สามารถพกพาหรือสวมใส่ไปกับร่างกายได้อย่างสะดวก มีขนาดเล็กกะทัดรัด มีสมบัติที่หลากหลาย เช่น การตรวจสอบ การเก็บข้อมูลจากร่างกายหรือประสาทสัมผัสต่าง ๆ และเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันเพื่อทำการประมวลผลหรือสั่งการได้ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับด้านต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย ตัวอย่าง Wearable devices เช่น นาฬิกาข้อมืออัจฉริยะ (Smart watch), หูฟังไร้สาย (Wireless headphone), สมาร์ทโฟน (Smart phone) เป็นต้น ดังแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 2.2 จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ A. Ometov และคณะ [14] พบว่าการพัฒนาอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) อย่างต่อเนื่อง ร่วมกับอำนาจและความต้องการของมนุษย์ในสังคมที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ตลาดการเติบโตของ Wearable devices เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับขั้นต่อไปในอนาคต ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบ 2.2 แสดงตัวอย่างของ Wearable device [14]



ภาพประกอบ 2.3 แสดงกราฟการคาดการณ์การเติบโตของตลาด Wearable devices [14]



ภาพประกอบ 2.4 แสดงวิวัฒนาการของ Wearable devices [14]

ในความเป็นจริงแล้ว Wearable devices มีต้นกำเนิดและวิวัฒนาการมาอย่างยาวนานตั้งแต่ก่อนศตวรรษที่ 20 แต่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงยุคสมัยปัจจุบัน ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพประกอบ 2.4 ที่มนุษย์ให้ความสนใจและให้ความนิยมเป็นอย่างมาก โดยการพัฒนาไม่เพียงแต่ปรับปรุงสมบัติให้ดียิ่งขึ้น แต่ส่งผลให้ Wearable devices มีรูปร่างที่แปลกใหม่ตามยุคสมัย มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็กลง และมีความยืดหยุ่นมาก ทำให้มีความสะดวกสบายในการพกพา และเหมาะกับการสวมใส่ที่สบายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญ คือ Wearable devices จะมีความฉลาดมากขึ้น ซึ่งจะเข้าไปแทรกซึมอยู่ในอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย ตัวอย่างเช่น ด้านการศึกษา ด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอ ด้านการแพทย์และสุขภาพ ซึ่งเป็นด้านที่ในงานวิจัยหลายงานได้ให้ความสนใจ โดยจากงานวิจัยของ Guk และคณะ [15] ได้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของ Wearable devices ที่เริ่มเข้าไปมีบทบาทมากขึ้นในทางการแพทย์ตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 21 ทำให้ Wearable devices สามารถไปอยู่ในเกือบทุกส่วนของร่างกายได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.5 และมีรูปแบบการทำงานที่ดีและเหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นแนวโน้มที่ดีของการพัฒนา Wearable devices ในด้านอื่น ๆ ซึ่งหนึ่งในกลุ่มที่ได้รับความสนใจและมีแนวโน้มที่จะพัฒนาอย่างต่อเนื่อง คือ สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic textiles; E-textiles)



ภาพประกอบ 2.5 แสดง Wearable devices ทางด้านการแพทย์และสุขภาพที่สามารถสวมใส่กับส่วนต่างๆ ของร่างกาย [15]

2.3 สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Textiles; E-Textiles)

สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ หรือ Electronic textiles มีการผสมผสานเทคโนโลยีอุตสาหกรรมจากสิ่งทอและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.6 เป็นหนึ่งในการประยุกต์ดัดแปลงเพื่อเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานและตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้มากยิ่งขึ้น แม้การผสมผสานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับสิ่งทอนั้นจะมีความเป็นไปได้ในช่วงแรกๆของการประดิษฐ์สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ แต่การเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวเข้ากับสิ่งทอนั้นดูจะไม่มีความสะดวกเนื่องจากความไม่เป็นระเบียบ สี และเส้นลวดของสายไฟที่นำมาทอรวมกับเสื้อผ้า อีกทั้งผู้ใช้งานยังมีความกังวลเรื่องความปลอดภัย และอันตรายที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำไปใช้งาน เนื่องจากสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ เมื่อนำไปสวมใส่ จะทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกอึดอัดและไม่สะดวก ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถใช้งานได้สะดวกและมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้นสำหรับเครื่องแต่งกายตามงานแฟชั่น การใช้งานทางการทหาร และงานตกแต่งต่างๆ เป็นต้น Pales Friedman จากสถาบันแพรตต์ได้กล่าวว่า “สิ่งที่ทำให้ผ้า

อัจฉริยะปฏิวัติในวงการได้ก็คือ พวกเขาสามารถที่จะทำสิ่งต่างๆมากมายที่เนื้อผ้าแบบดั้งเดิมไม่สามารถทำได้ ซึ่งจะรวมไปถึงการสื่อสาร การเปลี่ยนแปลง การนำพลังงาน และแม้กระทั่งการเติบโต”

ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ E-textiles กับอุตสาหกรรมเสื้อผ้า E-textiles สามารถทำให้เสื้อผ้าที่ผู้ใช้งานสวมใส่มีการเปลี่ยนสีและลวดลายเพื่อตอบสนองความต้องการต่อสภาพแวดล้อมรอบตัวของพวกเขา เช่น การเปลี่ยนแปลงการออกแบบเสื้อผ้าให้เป็นแบบไดนามิกเพื่อความสามารถในการอำพรางผู้คน E-textiles จึงเป็นข้อดีที่มีประโยชน์สำหรับคนอย่างนักล่าสัตว์และสมาชิกในกองทัพที่ต้องการความกลมกลืนกับสภาพแวดล้อมของพวกเขา และยังสามารถใช้ในการออกแบบตกแต่งภายในบ้าน ซึ่ง E-textiles สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. สิ่งทอกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คลาสสิก เช่น ตัวนำแผงวงจรไฟฟ้า, ไฟ LED, OLEDs และแบตเตอรี่ทั่วไปที่ฝังในตัวเสื้อผ้า

2. E-textiles พร้อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่รวมเข้ากับสิ่งทอโดยตรง ในกรณีนี้อาจรวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพาสซีฟ เช่น ตัวนำ (Conductor) และตัวต้านทาน (Insulator) หรือส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor), ไดโอด (Diode) และโซลาร์เซลล์ (Solar cell)



ภาพประกอบ 2.6 สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic textiles) [47]

แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานร่วมกับ E-textiles ส่วนใหญ่ก็ยังจำเป็นต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่อยู่ ซึ่งแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการกักเก็บพลังงานไว้เพื่อนำไปใช้ต่อ โดยถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ผ่านเซลล์กัลวานิก (galvanic cell) ที่ประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ พร้อมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) ซึ่งภายในแบตเตอรี่อาจจะประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียงแค่ 1 เซลล์ หรือมากกว่าก็ได้ แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น ไม่สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งแบตเตอรี่นั้นสามารถอัดประจุไฟฟ้าซ้ำเข้าไปใหม่ได้ (recharge) หลายครั้ง หรือที่เรียกกันว่าการชาร์จซ้ำ

แต่ประสิทธิภาพที่ได้จะอยู่ที่ประมาณ 80 % เท่านั้น เนื่องจากการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปในรูปแบบของความร้อน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการจ่ายประจุ โดยทั่วไปแบตเตอรี่จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบตเตอรี่ชนิดแห้ง (Dry Cell) เช่น ถ่านไฟฉาย และแบตเตอรี่ชนิดน้ำ (Wet Cell) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ แบตเตอรี่ต่าง พวกแบตเตอรี่ในมือถือ และแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead Acid Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานในรถยนต์ทั่วไป โดยแบตเตอรี่นั้นจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูง เกิดความเสียหายได้ง่ายขึ้นอยู่กับการดูแลรักษาและการใช้งานให้ถูกวิธี อายุการใช้งานของแบตเตอรี่นั้นจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของแบตเตอรี่ และหากมีการชาร์จซ้ำบ่อยๆ จะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่สั้นลงส่งผลให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ นอกจากนี้ การที่แบตเตอรี่มีขนาดใหญ่ยังทำให้เกิดข้อจำกัดในการลดขนาดของอุปกรณ์ และแบตเตอรี่ยังการมีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน ทำให้ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) จึงได้เข้ามาทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

2.4 เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting Technology)

เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานทางเลือก หรือพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานกับวงจรไฟฟ้า และในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งพลังงานหมุนเวียน หรือ Renewable Energy เป็นพลังงานที่ใช้งานแล้วไม่มีวันหมดไป ซึ่งพลังงานเหล่านี้ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นจากน้ำ ลม แสงอาทิตย์ ความร้อนจากใต้พิภพ และชีวมวล หรืออาจเป็นผลผลิต เศษเหลือทิ้งจากการเกษตร หรือมูลสัตว์ก็สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตให้เป็นพลังงานหมุนเวียนได้เป็นอย่างดี พลังงานหมุนเวียนนั้นถือเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ทำให้ไม่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งประเภทของพลังงานหมุนเวียนที่นิยมใช้กันทั่วโลกในยุคปัจจุบันหลักๆ คือ พลังงานจากน้ำ พลังงานจากลม พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากความร้อนใต้พิภพ และพลังงานจากชีวมวล [43] ซึ่งแหล่งพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting) ในการนำพลังงานไปใช้งาน อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานได้ ยกตัวอย่างเช่น

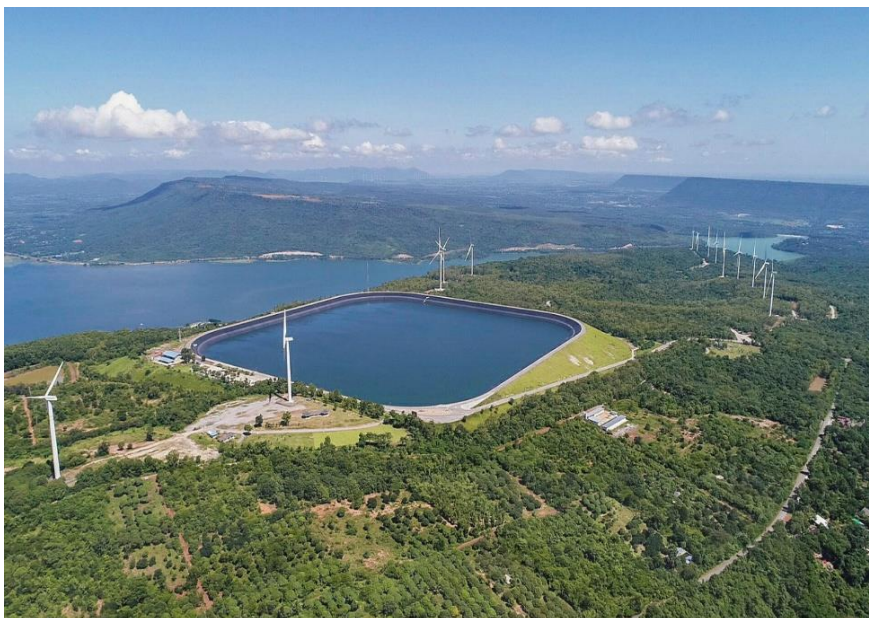
2.4.1 พลังงานจากน้ำ (Hydropower) น้ำเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุด และเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ใช้อย่างไม่มีวันหมดไป ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย นอกจากนี้ยังใช้เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้เทคโนโลยีกังหันน้ำที่

อาศัยหลักการเปลี่ยนรูปของพลังงานจากน้ำที่เก็บกักในเขื่อนให้ไหลผ่านท่อส่งน้ำผ่านไปปั่นกังหันน้ำ และส่งพลังงานกลไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้น



ภาพประกอบ 2.7 โรงไฟฟ้าพลังน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Reservoir) [43]

2.4.2 พลังงานจากลม (Wind Energy) เป็นพลังงานที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิกับความกดอากาศ ในปัจจุบันจึงได้มีการนำประโยชน์จากพลังงานลมมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีกังหันลม หลักการทำงาน คือ เมื่อกระแสลมปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานกล หลังจากนั้นจึงนำพลังงานกลที่เกิดจากการหมุนไปใช้งาน โดยที่ปริมาณไฟฟ้าที่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ความยาวของใบพัด และสถานที่ที่ติดตั้ง เนื่องจากพลังงานจากลมนั้นมีอยู่ทั่วไปและยังเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ และสามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด



ภาพประกอบ 2.8 เทคโนโลยีกังหันลม [43]

2.4.3 พลังงานจากแสงอาทิตย์ (Solar Energy) เป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างมากมายในธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาดโดยถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง ซึ่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ก็สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ยกตัวอย่างการใช้งาน เช่น โซลาร์เซลล์ (Solar cell)



ภาพประกอบ 2.9 เซลล์แสงอาทิตย์ หรือโซลาร์เซลล์ (Solar cell) [43]

2.4.4 พลังงานความร้อนจากใต้พิภพ (Geothermal Energy) เป็นพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ใต้ผิวโลก โดยเก็บอยู่ในรูปของน้ำหรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการนำพลังงานความร้อนจากใต้พิภพมาใช้ผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าทำได้โดยนำน้ำที่ได้ไปถ่ายเทความร้อนไปยังของเหลวหรือสารที่มีจุดเดือดต่ำ จนเดือดและระเหยเป็นไอ จากนั้นจะนำไอน้ำที่ได้ไปใช้หมุนกังหันซึ่งมีเพลาต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าต่อไป

2.4.5 พลังงานจากชีวมวล (Biomass) เป็นพลังงานที่ได้จากธรรมชาติโดยกักเก็บไว้ในรูปสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ได้จากกากหรือเศษวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ใบและยอดอ้อย เศษไม้ กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กาบและกะลามะพร้าว ขยะมูลฝอย หรือแม้แต่มูลสัตว์ ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทซึ่งจะใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าชีวมวลต่อไป ได้แก่

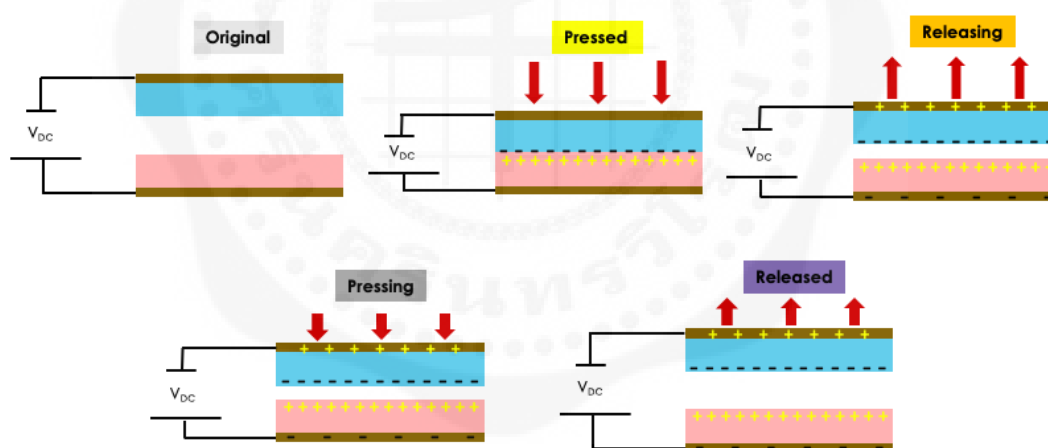
1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากชีวมวลโดยตรง (Direct Combustion)
2. กระบวนการเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion) จะทำให้ได้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เช่น การหมักน้ำเสียจากพวกกากมันสำปะหลัง กากอ้อย เป็นต้น

แต่การเก็บเกี่ยวพลังงานเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดทางธรรมชาติทำให้ไม่สามารถเก็บเกี่ยวได้ทุกเมื่อที่ต้องการ เช่น ช่วงเวลา และสภาพอากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานทางเลือกบนพื้นฐานการเปลี่ยนพลังงานกลที่เกิดจากการสัมผัสและการเคลื่อนไหวร่างกายของมนุษย์ ซึ่งทำให้สามารถลดข้อจำกัดในการเก็บเกี่ยวพลังงานได้ เนื่องจากสามารถเก็บเกี่ยวได้ทุกช่วงเวลาที่ต้องการ ทำให้พลังงานเชิงกลกลายเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

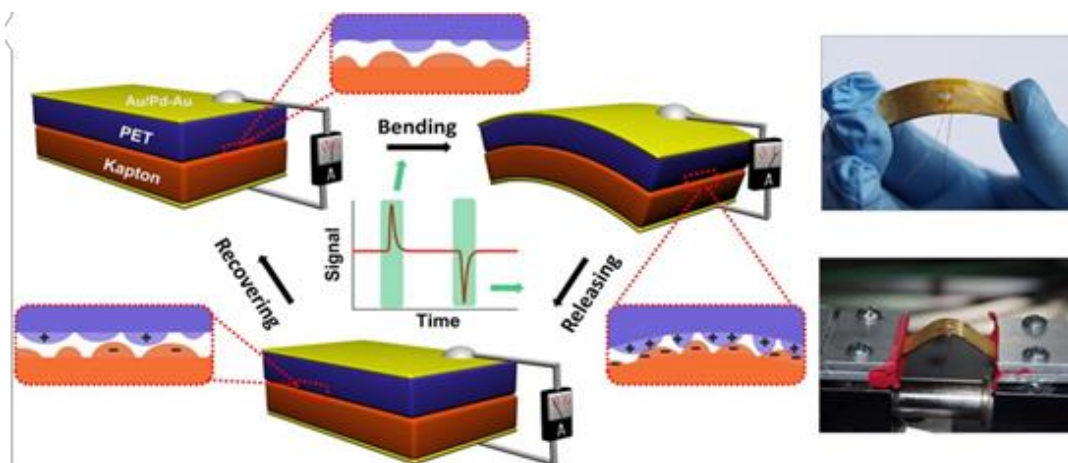
2.4.6 พลังงานเชิงกล (Mechanical Energy) ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลแล้วเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยมี 2 ชนิดหลัก ได้แก่ อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric nanogenerator) หรือ PENG เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจำเป็นต้องประกอบด้วยวัสดุที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะ โดยเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ที่อยู่ในโครงสร้าง และเกิดความไม่สมมาตรของโครงสร้างขึ้น จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าปรากฏการณ์นี้ว่า Direct Effect และอุปกรณ์อีกชนิดที่ผู้วิจัยให้ความสนใจ คือ อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator) หรือ TENG ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลจากการสัมผัสหรือเสียดสีกันของวัสดุสองชนิด เพื่อเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็ก-ทริก (Triboelectric effect) หรือปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต

2.5 อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator; TENG)

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก หรือ Triboelectric nanogenerator (TENG) ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรก ในปี 2012 โดยศาสตราจารย์ Wang และคณะ [6] เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลจากการสัมผัสเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) หรือปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุ 2 ชนิด เกิดการเสียดสีหรือสัมผัสกัน จะเกิดประจุไฟฟ้าชั่วคราวข้ามขึ้นที่ผิวของทั้งสองวัสดุ จากนั้นเมื่อวัสดุแยกออกจากกัน จะเกิดการเหนี่ยวนำให้ประจุที่ขั้วโลหะ มีประจุตรงข้ามกับสภาพประจุที่ผิวของวัสดุ ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าออกไปสู่วงจรไฟฟ้าภายนอกผ่านขั้วไฟฟ้า [7] ดังแสดงในภาพประกอบ 2.10 โดยจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก TENG นั้นเพียงพอสำหรับขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของ TENG นั้นไม่ซับซ้อน จะประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิดที่แตกต่างกันวางประกบกันและด้านหลังของวัสดุแต่ละชนิดจะมีชั้นโลหะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 2.11



ภาพประกอบ 2.10 ปรากฏการณ์ที่เกิดเมื่อวัสดุ 2 ชนิดสัมผัสกัน



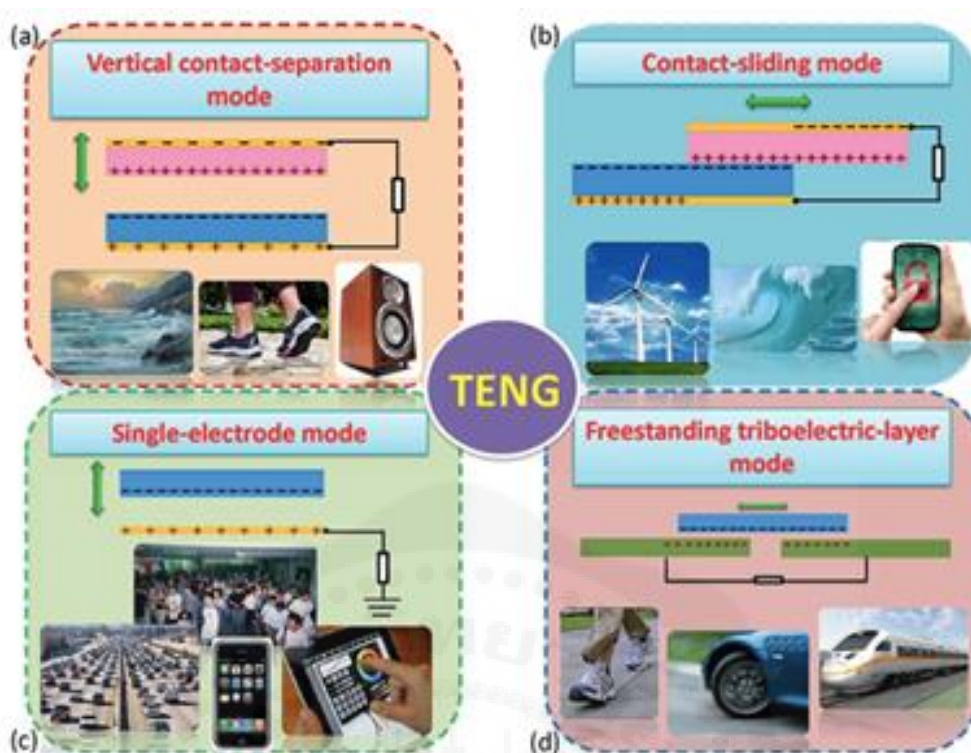
ภาพประกอบ 2.11 โครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก [6]

2.5.1 โครงสร้างของ TENG โครงสร้างของ TENG แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.12

2.5.1.1 Contact-separation mode คือ รูปแบบของวัสดุ 2 ชนิดที่มาประติงค์เป็น TENG และมีขั้วโลหะ (Electrode) ที่ด้านบนและด้านล่างของโครงสร้าง โดยวัสดุทั้ง 2 จะมีช่องว่างระหว่างกัน เมื่อโครงสร้างได้รับแรงกลจากภายนอก ทำให้วัสดุทั้ง 2 ชนิด เกิดการสัมผัส และแยกออกจากกัน ซ้ำไปมา ซึ่งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นตามจังหวะของการให้แรงกล

2.5.1.2 Lateral-sliding mode การทำงานของโครงสร้าง TENG รูปแบบนี้จะเป็นการเคลื่อนที่แบบเลื่อนระหว่างพื้นผิวของวัสดุ โดยพื้นผิวของวัสดุทั้ง 2 ชนิดจะเกิดการเสียดสีกันตามทิศทางของการเลื่อนของโครงสร้างในแนวนอน ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตที่รอยต่อและเกิดการเหนี่ยวนำประจุ โดยหลักการทำงานของ TENG ในรูปแบบนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นผิวสัมผัสที่เกิดจากการเลื่อน

2.5.1.3 Freestanding layer mode โครงสร้าง TENG รูปแบบนี้ขึ้นกับการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นไทรโบอิเล็กทริก ที่จะเลื่อนไปตามแนวนอนเพื่อสัมผัสหรือเสียดสีกับขั้วโลหะทั้ง 2 ขั้วที่อยู่หนึ่ง ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะ โดยโครงสร้างรูปแบบนี้ ถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการเกิดพลังงานที่สูงที่สุด



ภาพประกอบ 2.12 โครงสร้าง TENG 4 แบบ [7]

2.5.1.4 Single-electrode mode โครงสร้าง TENG รูปแบบนี้ประกอบไปด้วยขั้วโลหะ 1 ขั้วหรือข้างเดียว แต่ก็ยังสามารถเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต โดยจะเกิดอิเล็กตรอนอิสระและสร้างกระแสไฟฟ้าผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอก

2.5.2 หลักการทำงานของ TENG ประกอบด้วย 2 หลักการ คือ หลักการเกิดไฟฟ้าสถิต และหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต [7]

2.5.2.1 หลักการเกิดไฟฟ้าสถิต (Triboelectric effect) เมื่อนำวัสดุ 2 ชนิดที่ต่างกันมาเสียดสีหรือสัมผัสกัน โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนแตกต่างกัน โดยวัสดุที่มีความสามารถในการให้หรือเสียอิเล็กตรอนได้ง่าย จะแสดงอำนาจเป็นขั้วบวก (Positive) และอีกวัสดุหนึ่งที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี จะแสดงอำนาจขั้วลบ (Negative) ส่งผลให้เกิดประจุขั้วตรงข้ามขึ้นที่ผิวของวัสดุทั้ง 2 โดยแนวโน้มหรือความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนของวัสดุแต่ละชนิดจะถูกสรุปในตาราง Triboelectric series ดังแสดงในภาพประกอบ 2.13

	Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	
	Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 11	Polyisobutylene	
	Polyamide 6-6	Polyurethane flexible sponge	
	Melanime formol	Polyethylene Terephthalate	
	Wool, knitted	Polyvinyl butyral	
	Silk, woven	Polychlorobutadiene	
	Aluminum	Natural rubber	
	paper	Polyacrilonitrile	
	Cotton, woven	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Steel	Polybisphenol carbonate	
	Wood	Polychloroether	
	Hard rubber	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Nickel, copper	Polystyrene	
	Sulfur	Polyethylene	
	Brass, silver	Polypropylene	
	Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
	Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyvinyl Chloride (PVC)	
	Polyvinyl alcohol	Polydimethylsiloxane (PDMS)	
	(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

ภาพประกอบ 2.13 ตาราง Triboelectric series [7]

2.5.2.2 หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electric induction) หลังจากเกิดประจุไฟฟ้าชั่วคราวข้ามขึ้นที่ผิวของวัสดุทั้ง 2 ชนิด เมื่อวัสดุแยกออกจากกัน จะเกิดการเหนี่ยวนำให้ประจุที่ขั้วโลหะ มีประจุตรงข้ามกับสภาพประจุที่ผิวของวัสดุ ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าออกไปสู่วงจรไฟฟ้าภายนอกผ่านขั้วไฟฟ้า

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ TENG นั้นมีหลากหลายทั้งพอลิเมอร์ เซรามิก และโลหะ [16] แต่วัสดุที่นิยมและได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก คือ วัสดุประเภทพอลิเมอร์ จากบทความของ Y. Wang และคณะ [17] พบว่ามีงานวิจัยมากมายได้ผลิต TENG ให้มีความยืดหยุ่นและสามารถจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนบุคคลได้ ซึ่งล้วนมาจากการใช้วัสดุพอลิเมอร์มาประดิษฐ์เป็น TENG ในงานวิจัยของ S. Li และคณะ [18] ได้ทำการประดิษฐ์ TENG จากซิลิโคน ซึ่งสามารถให้ความยืดหยุ่น และเมื่อทำการทดสอบผลทางไฟฟ้าด้วยการยืด (Stretching) และการดัด (Bending) พบว่าได้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูง นอกจากนี้ TENG ยังมีความทนทานสูงและกันน้ำ สมบัติเหล่านี้ทำให้ TENG สามารถนำไปใช้งาน รวมเข้ากับเสื้อผ้าและรองเท้าได้จริง เพื่อการ

ขับเคลื่อน Wearable devices จึงได้มีการประดิษฐ์รองเท้า สำหรับออกกำลังกายที่มีฟังก์ชันการรับรู้ และระบบ Self-charging power แสดงให้เห็นว่าวัสดุพอลิเมอร์สามารถพัฒนาให้มีความยืดหยุ่นสูงและมีสมบัติที่เหมาะสม เพื่อใช้งานอุปกรณ์ได้หลากหลาย โดยเฉพาะเสื้อผ้า เครื่องสวมใส่ รวมถึงใช้งานกับการขยับร่างกายของมนุษย์ ในปัจจุบันจึงมีการใช้อุปกรณ์ TENG ร่วมกับสิ่งทอ (Textiles) และมีแนวโน้มที่จะพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต แต่นอกจากการเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานแล้ว การเลือกวัสดุมาประยุกต์ใช้ใน TENG ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้า เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนต่างกัน ส่งผลต่อการมีขั้วบวกและลบต่างกัน รวมถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งจะสามารถเลือกใช้วัสดุเพื่อมาประดิษฐ์เป็น TENG ได้อย่างเหมาะสมจากตาราง Triboelectric series ที่แสดงให้เห็นดังภาพประกอบ 2.13 โดยตาราง Triboelectric series มีวัสดุหลากหลายประเภทรวมไปถึงวัสดุประเภทสิ่งทอ ซึ่งหนึ่งในนั้น คือ คอตตอน (Cotton)

2.6 ผ้าคอตตอน (Cotton)

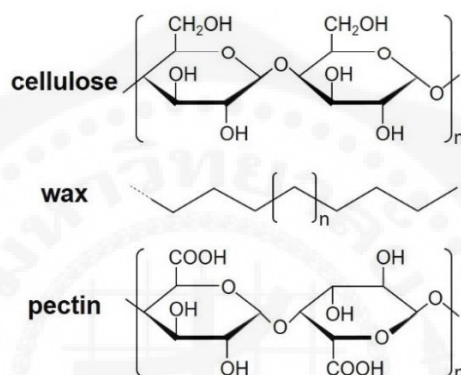
ผ้าคอตตอน (Cotton) เป็นเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) ที่ได้จากดอกของคอตตอน องค์กรประกอบหลักจึงประกอบไปด้วย เซลลูโลส ร้อยละ 96 สารเพกติน ร้อยละ 1.2 ซีฟี่ ร้อยละ 0.6 โดยโครงสร้างทางเคมีของผ้าคอตตอนจะมีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ คือ หมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.14 การมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) นั้นส่งผลต่อความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี เมื่อสัมผัสกับวัสดุอื่น ดังนั้น คอตตอนจึงถูกจัดให้มีสภาพเป็นขั้วบวก (Positive) นอกจากนี้ ผ้าคอตตอนยังนิยมนำมาใช้ในการผลิตสิ่งทอและถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย [19] ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพประกอบ 2.15 มีสมบัติทางกลที่ดี เหมาะสำหรับนำมาทำเป็นเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม คอตตอนจึงถือว่าเป็นเส้นใยที่มีความเก่าแก่ เพราะมีการใช้ในการถักทอผ้ามาแต่สมัยโบราณ จากหลักฐานที่บ่งบอกถึงการปลูกคอตตอน และการปั่นคอตตอนเพื่อทำเป็นเส้นด้าย

2.6.1 สมบัติของคอตตอน

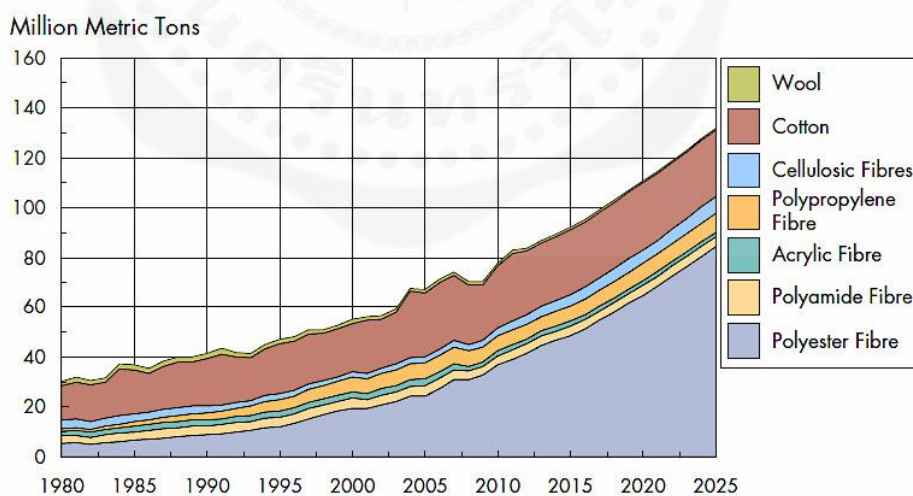
2.6.1.1 สมบัติทางกายภาพ ลักษณะภายนอกของคอตตอนจากธรรมชาติ จะมีสีขาวไปจนถึงสีน้ำตาล มีลักษณะคล้ายหลอดแบน ปิดเป็นเกลียว พื้นที่ทำหน้าตัดเป็นทรงเม็ดถั่วและตรงกลางมีรู ซึ่งเกิดจากท่อส่งน้ำตามแกนกลางของเส้นใย เส้นใยมีผิวไม่เรียบ มีความทึบแสง ความมันน้อย โดยคอตตอนจะมีความแข็งแรงปานกลางแต่เมื่อคอตตอนเปียกน้ำความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 10-20 สมบัติทางกายภาพที่เด่นของคอตตอน คือ สมบัติการดูดซับความชื้น โดยคอตตอนมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี ส่งผลให้เมื่อนำไปถักทอเป็นเสื้อผ้า จะทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบาย ระบายเหงื่อได้ดีและมีอึดอัด

ร่างกาย นอกจากนี้คอตตอนยังทนต่อความร้อนได้ดีและมีความถ่วงจำเพาะไม่สูงมาก ทำให้คอตตอนมีน้ำหนักเบา

2.6.1.2 สมบัติทางเคมี คอตตอนสามารถทนต่อการกัด ด่างและสารละลายอินทรีย์ทั่วไปได้ดี แต่คอตตอนนั้นไม่ทนต่อแสงแดด เพราะแสงแดดจะทำให้คอตตอนเสื่อมคุณภาพลง นอกจากนี้คอตตอนยังไม่ทนต่อแมลงและรา สาเหตุมาจากแป้งที่ตกค้างในคอตตอน สมบัติทางเคมีที่เด่นของคอตตอน คือ คอตตอนสามารถรับสีย้อมได้ดีและรับได้หลากหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ สีแวท สีไดเรกต์ และสีเบสิก เป็นต้น



ภาพประกอบ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของผ้าคอตตอน (Cotton) [8]



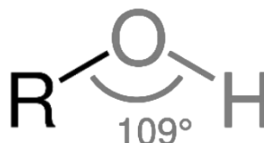
ภาพประกอบ 2.15 แสดงกราฟ World fiber production [20]

เนื่องจากสมบัติของคอตตอน คอตตอนจึงเป็นตัวเลือกในการนำไปประยุกต์ใช้กับ TENGs ในงานวิจัยหลายๆงาน เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและนำไปพัฒนาเพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ต่างๆที่สามารถสวมใส่หรือใช้กับร่างกายมนุษย์ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ในปี 2019 Jeong และคณะ [8] ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้า โดยนำผ้าคอตตอน ที่มีการฉีกทอด้วยรูปแบบ (Pattern) ลายขัดธรรมดา (Plain) มาประยุกต์ใช้งานเป็นชั้นสัมผัสใน TENG เมื่อผ้าคอตตอนเกิดการสัมผัสเสียดสีกัน ทำให้โมเลกุลในโครงสร้างจุลภาคเกิดการชนกันและเกิดเป็น Triboelectric charges ซึ่งสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ได้เพียง 1.59 V แสดงให้เห็นว่าค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่ได้จากผ้าคอตตอนนั้น มีค่าไม่สูงมาก และยังไม่เพียงพอสำหรับนำไปขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ การปรับปรุงประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ TENG จากการใช้ผ้าคอตตอน โดยการทำเป็นคอมโพสิตหรือการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน สำหรับประยุกต์ใช้ใน Textiles จึงมีความน่าสนใจ

2.7 หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups)

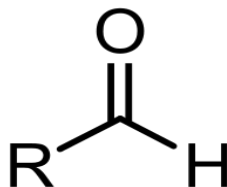
หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) คือ กลุ่มของอะตอมที่เป็นส่วนโครงสร้างย่อยของโมเลกุล โดยมีองค์ประกอบและโครงสร้างเฉพาะตัว และยังมีบทบาทในการกำหนดการทำปฏิกิริยา สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของสารเคมีชนิดนั้นๆ จึงอาจใช้หมู่ฟังก์ชันเป็นเกณฑ์ในการจำแนกสารประกอบอินทรีย์ (Organic compounds) ชนิดต่างๆ ได้โดยกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่สำคัญๆที่จำแนกตามชนิดของหมู่ฟังก์ชัน เช่น

หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ใช้ในการบอกถึงหมู่ฟังก์ชัน -OH ในสารประกอบอินทรีย์ (Organic compounds) ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลติดอยู่ จะเรียกว่า สารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ (Alcohol) มีสูตรทั่วไปเป็น R-OH แอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลที่มีขั้วเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity; EN) ระหว่างอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน และเนื่องจากการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล แอลกอฮอล์จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแอลกอฮอล์ได้ซึ่งส่งผลทำให้มีจุดเดือดที่สูง การแยกประเภทของแอลกอฮอล์พิจารณาจากจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิล



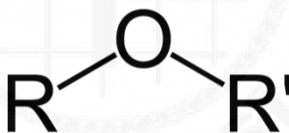
ภาพประกอบ 2.16 โครงสร้างของแอลกอฮอล์ (Alcohol) [44]

หมู่ฟังก์ชันแอลคอกซี (Alkoxy group) บอกถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน $-O-R$ ในสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันแอลคอกซีติดอยู่จะเรียกว่า สารประกอบประเภท อีเทอร์ (Ethers) โครงสร้างของอีเทอร์คือมีอะตอมออกซิเจนที่เชื่อมต่อกับหมู่แอลคอกซีหรือแอลสองกลุ่มซึ่งเป็นไปตามสูตรทั่วไป คือ $R-O-R'$



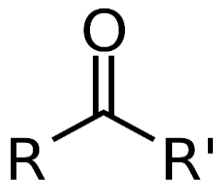
ภาพประกอบ 2.17 โครงสร้างของประเภทอีเทอร์ (Ethers) [45]

หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซาลดีไฮด์ (Carboxaldehyde group) บอกถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน $-CHO$ ในสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซาลดีไฮด์เรียกว่า สารประกอบประเภทแอลดีไฮด์ (Aldehyde) โดยโครงสร้างมีคาร์บอนอยู่ตำแหน่งกลางและสร้างพันธะกับไฮโดรเจนและหมู่ R มีสูตรทั่วไปเป็น $RCHO$ แอลดีไฮด์เป็นโมเลกุลมีขั้ว ละลายน้ำได้ดีเป็นผลมาจากหมู่คาร์บอกซาลดีไฮด์ที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนและอะตอมของคาร์บอน ซึ่งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีที่แตกต่างกัน และยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้



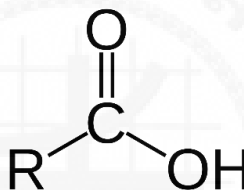
ภาพประกอบ 2.18 โครงสร้างของแอลดีไฮด์ (Aldehyde) [45]

หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl group) บอกถึงการมีอยู่ของหมู่ $C=O$ ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลก็คือ คีโตน (Ketone) โดยที่โครงสร้างของคีโตนประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนที่เชื่อมกับอะตอมของออกซิเจนด้วยพันธะคู่ มีสูตรทั่วไปเป็น $RCOR'$ เมื่อ R และ R' เป็นหมู่แอลคิล (Alkyl group) หรือหมู่แอริล (Aryl group) สารประกอบคีโตนมีสมบัติที่คล้ายกับสารประกอบแอลดีไฮด์ เนื่องจากมีโครงสร้างที่คล้ายกัน



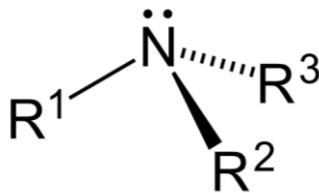
ภาพประกอบ 2.19 โครงสร้างของคีโตน (Ketone) [45]

หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Carboxyl group) เป็นกลุ่มของกรดอินทรีย์ (Organic acids) ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน -COOH ที่เรียกว่ากรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) โดยหมู่คาร์บอกซิลนี้จะประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เชื่อมต่อกับอะตอมของคาร์บอนเดียวกัน ทำให้มีสูตรทั่วไปเป็น R-COOH โดยกรดคาร์บอกซิลิกนั้นสามารถละลายน้ำได้เนื่องจากโมเลกุลมีสภาพขั้วโมเลกุลสูง สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้



ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างของกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) [46]

หมู่ฟังก์ชันอะมิโน (Amino group) บอถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน -NH₂ ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่อะมิโนก็คือ เอมีน (Amine) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประกอบด้วยอะตอมไนโตรเจนที่มีอิเล็กตรอนคู่เดียว และเกิดจากหมู่แอลคิล (Alkyl group) หรือหมู่แอริล (Aryl group) เข้ามาแทนที่ไฮโดรเจนที่อยู่ในโมเลกุลของแอมโมเนียซึ่งมีหมู่อะมิโนเป็นหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เอมีนเป็นสารประกอบที่มีความเป็นเบสสูง โดยเอมีนทุกชนิดสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับตัวทำละลายที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโมเลกุลได้ ซึ่งทำให้สามารถละลายน้ำได้ และมีจุดเดือดที่สูงขึ้นได้ แต่ต่ำกว่าของแอลกอฮอล์เนื่องจากพันธะระหว่าง O-H นั้นมีขั้วมากกว่าพันธะระหว่าง N-H จึงทำให้พันธะไฮโดรเจนในแอลกอฮอล์ และในกรดคาร์บอกซิลิกมีความแข็งแรงกว่ามากกว่าพันธะไฮโดรเจนในเอมีน

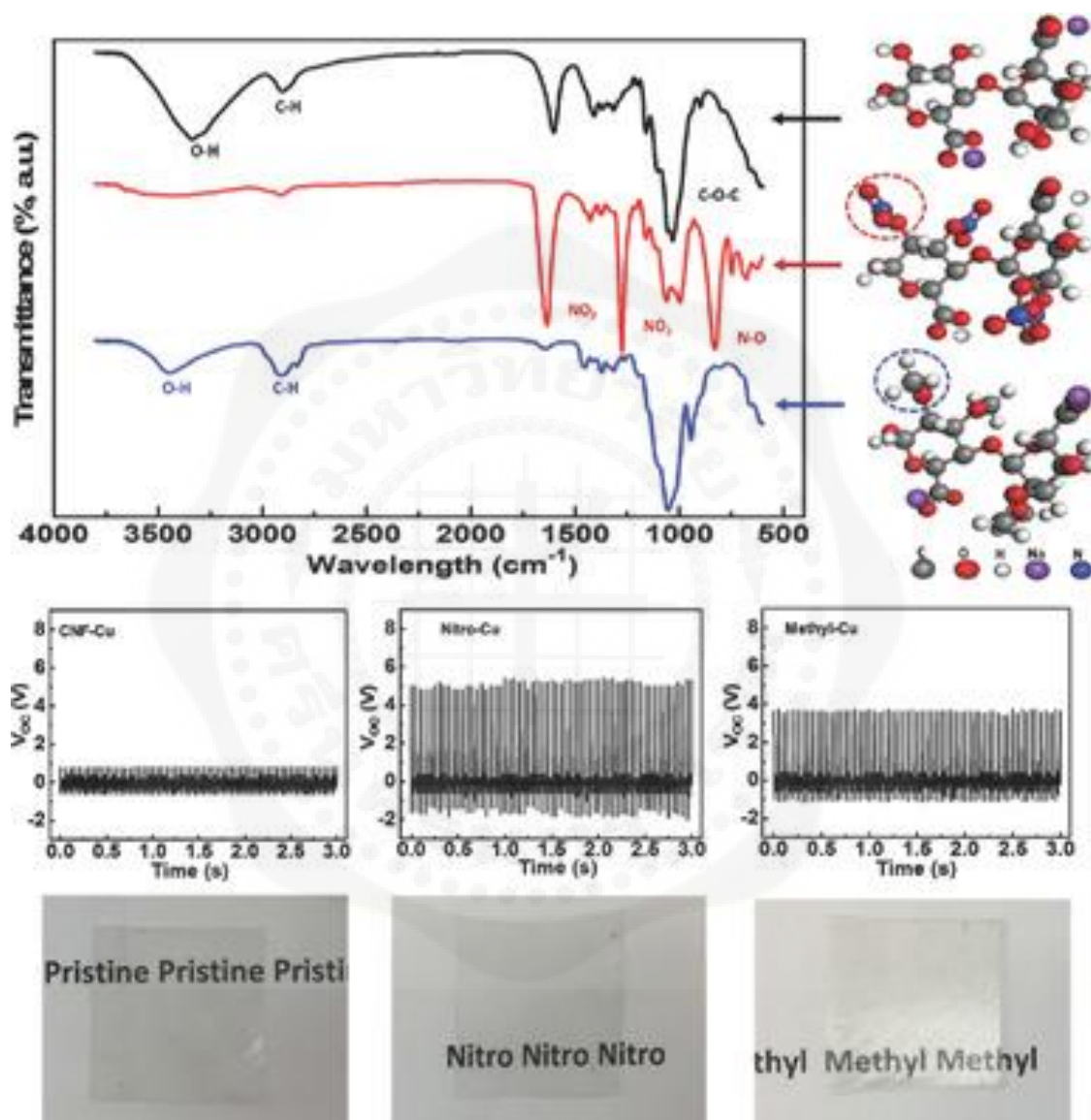


ภาพประกอบ 2.21 โครงสร้างของเอมีน (Amine) [45]

ซึ่งการให้และรับอิเล็กตรอนของหมู่ฟังก์ชันโดยส่วนใหญ่จะขึ้นจำนวนอะตอมของธาตุ ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity; EN) และค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron affinity; EA) ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในหมู่ฟังก์ชัน โดยค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี หมายถึง ค่าที่แสดงออกถึงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมของธาตุที่จะเกิดพันธะร่วมกันแล้วกลายเป็นโมเลกุล ซึ่งธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงจะทำให้มีความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนได้ดี เช่น พวกโลหะ ส่วนธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่ำจะทำให้มีความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนได้ไม่ดี เช่น พวกโลหะ และค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน หมายถึง ค่าที่แสดงถึงพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาเมื่ออะตอมในสถานะแก๊สได้รับอิเล็กตรอน โดยธาตุที่มีค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน หรือค่า EA เป็นลบ (-) เป็นผลมาจากการปล่อยพลังงานออกมา ทำให้อะตอมนั้นมีแนวโน้มที่จะมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี เช่น พวกโลหะ ส่วนธาตุที่มีแนวโน้มที่จะมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี คือธาตุที่มีค่า EA มีค่าเป็นลบ (-) ถึงค่าบวก (+) น้อยๆ เช่น พวกโลหะ [46]

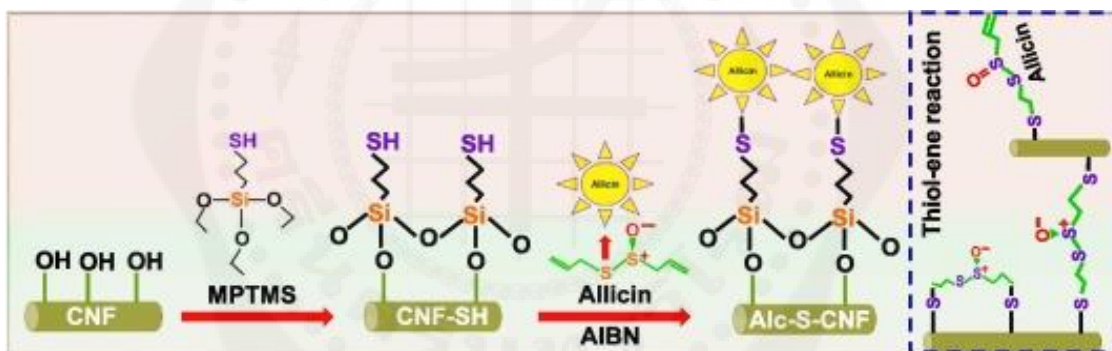
ทำให้เห็นความสำคัญของหมู่ฟังก์ชันที่ส่งผลต่อความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนของวัสดุ ซึ่งที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่มองเห็นถึงความสำคัญของหมู่ฟังก์ชันในการนำไปปรับปรุงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น ในปี 2017 C. Yao และคณะ [13] ได้มีการใช้วิธี Chemical functionalization เพื่อเพิ่มคุณสมบัติโพรบอิเล็กทริกให้กับเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose nanofiber; CNF) โดยจะมีการใช้กรดไนตริก (Nitration acid) ที่ผสมจากกรดไนตริก กรดซัลฟูริก และน้ำ ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจะนำเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการอบมาจาก CNF hydrogel ใส่ลงในสารละลายกรดนี้ จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำ DI ที่มีโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) เป็นองค์ประกอบอยู่ และนำไปกระจายตัวในเอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate) ที่ทิ้งไว้ให้เอทิลอะซิเตทระเหยออกที่อุณหภูมิห้อง จะได้เป็น Nitro CNF film ซึ่งมีความเป็นประจุลบ ที่ผิวมีหมู่นิโตร (Nitro group) เชื่อมพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลส นอกจากนี้แล้วยังมีการทำ Methyl CNF film ซึ่งมีความเป็นประจุบวกที่ผิว โดยการใส่เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการอบมาจาก CNF hydrogel แล้ว ใส่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำ DI แล้วใส่ลงในสารละลายไดเมทิลซัลเฟต (Dimethyl sulfate) จนได้เป็น Methyl CNF

fiber จากนั้นนำไปใส่ในน้ำ DI แล้วให้ความร้อน จะเกิดการฟอร์มตัวเป็น hydrogel ออกมา นำ hydrogel นี้ไปกรองแล้วตากให้แห้งจะได้เป็น Methyl CNF film เมื่อได้ Nitro CNF film กับ Methyl CNF film แล้ว จะนำไปทำเป็นชั้นสัมผัสใน TENG โดยในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (Output current) ได้ที่ 9 μA และค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้สูงสุด (Output voltage) ได้ที่ 8 V

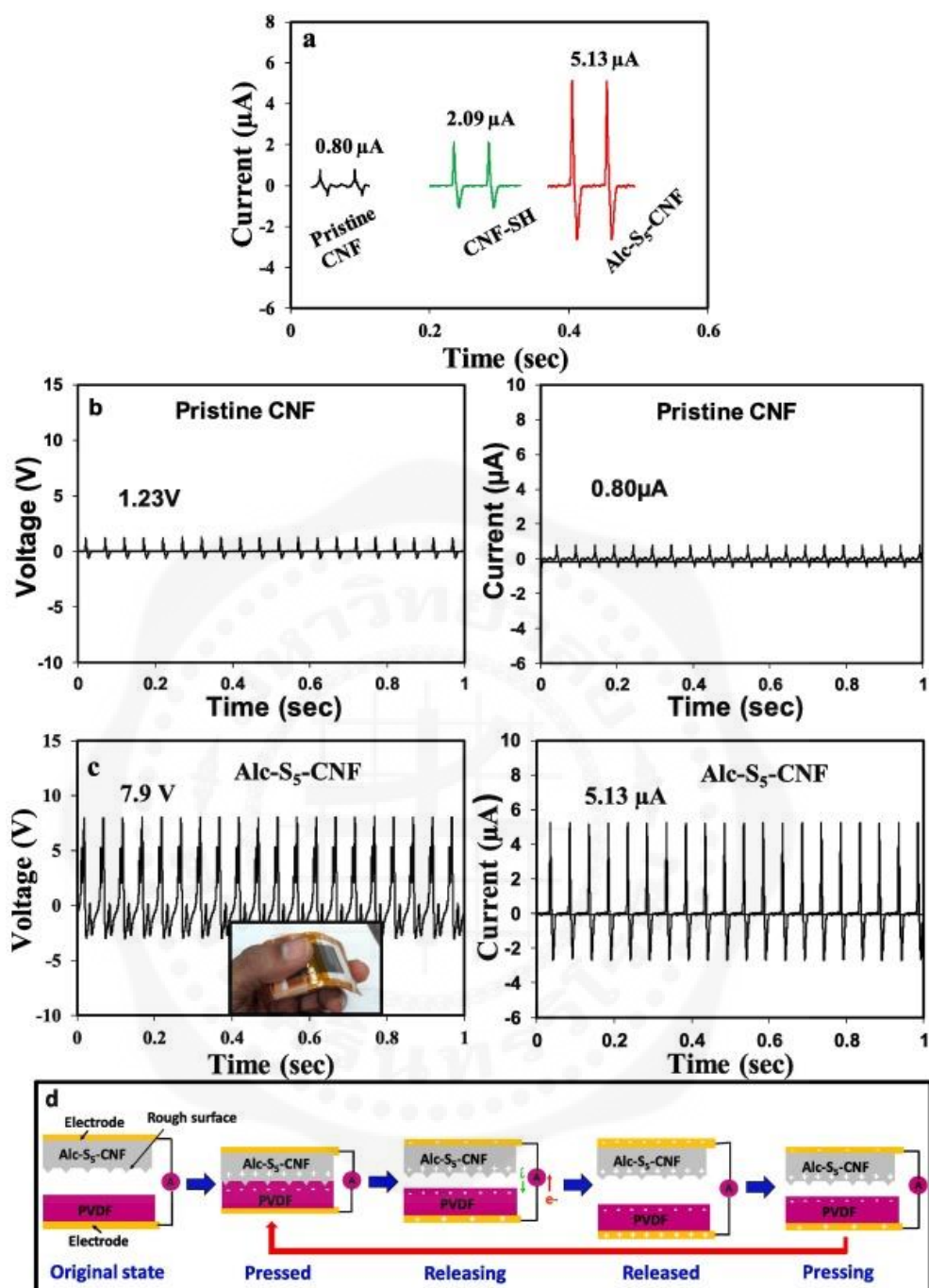


ภาพประกอบ 2.22 แสดงกราฟ FTIR ของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (แถวบนสุด), Nitro CNF (แถวกลาง) และ Methyl CNF (แถวล่าง), แสดงกราฟค่ากระแสไฟฟ้า (Output current) และค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage), ภาพถ่ายแสดงฟิล์มสีที่ประดิษฐ์จากเส้นใยนาโนเซลลูโลสทั้งสามชนิด [13]

ในปี 2019 S. Roy และคณะ [11] ได้มีการใช้สารอัลลิซิน (Allicin) ที่สกัดได้จากน้ำกระเทียม มาใช้ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติไทรโบอิเล็กทริกให้กับเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanofiber) โดยเริ่มต้นจากใช้สาร (3-Mercaptopropyl) trimethoxysilane 95 % (MPTMS) เพื่อทำให้ผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันของไทออล (Thiol) เกิดขึ้นก่อน จากนั้นจะอาศัยปฏิกิริยาไทออล-อิน (Thiolene reaction) ในการช่วยให้หมู่ฟังก์ชันซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide groups) หรือ $-S=O$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของอัลลิซินไปติดบนเส้นใยนาโนเซลลูโลส ในกระบวนการนี้จะทำให้ฟิล์มเส้นใยนาโนเซลลูโลส มีความเป็นบวกสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มเข้ามาของหมู่ซัลฟอกไซด์ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี จากนั้นนำไปเป็นชั้นสัมผัสใน TENG ร่วมกับวัสดุที่มีความเป็นลบสูง คือ Polyvinylidene fluoride (PVDF) โดยในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า (Output current) และค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) สูงสุดที่ $5.13 \mu A$ และ $7.9 V$ ตามลำดับและ ซึ่งสูงกว่า TENG ที่ใช้เซลลูโลสธรรมดาประมาณ 6.5 เท่า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density) เพิ่มขึ้นกว่า 41 เท่า ซึ่งประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดีของหมู่ฟังก์ชันซัลฟอกไซด์ของอัลลิซิน

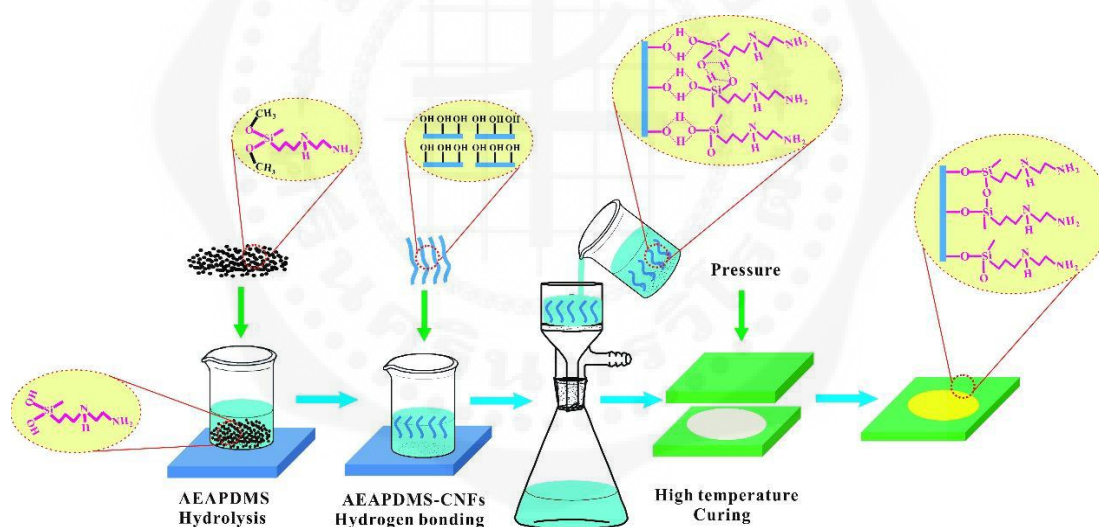


ภาพประกอบ 2.23 กลไกการสังเคราะห์ของการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันอัลลิซิน (Allicin) ลงบนเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanofiber) [11]



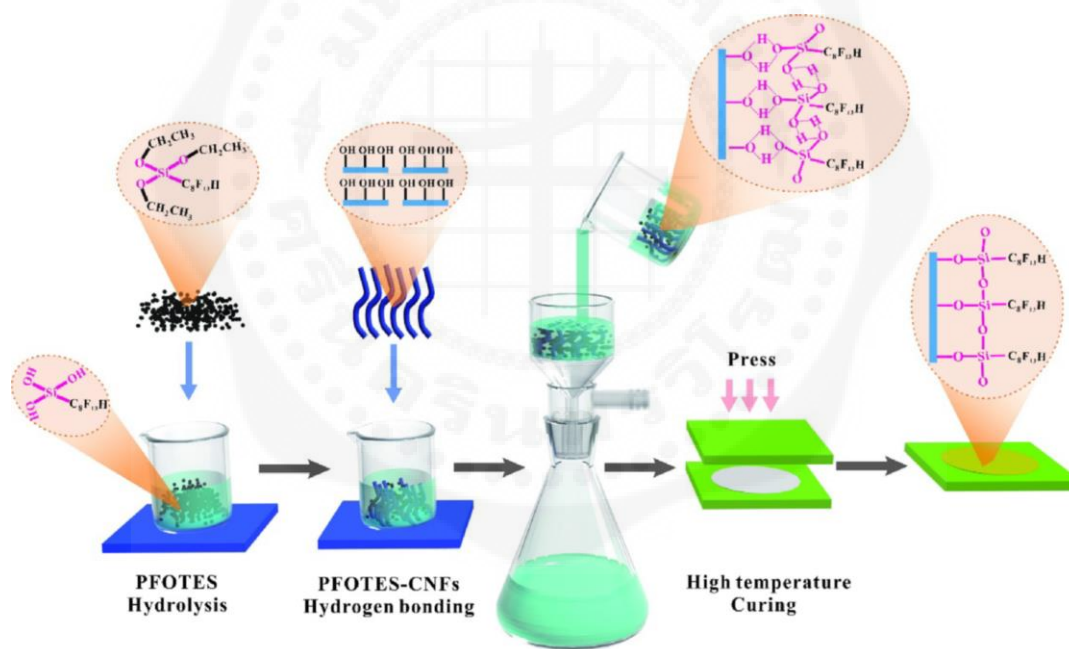
ภาพประกอบ 2.24 (a) แสดงค่ากระแสไฟฟ้า (Output current) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanofiber) ก่อนและหลังการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชัน, (b) และ (c) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanofiber) ก่อนและหลังการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชัน และ (d) แสดงรูปกลไกการทำงานของ TENG [11]

ในปี 2020 S. Nie และคณะ [10] มีการใช้วิธี Chemical functionalization เพื่อปรับปรุงความชื้นบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose nanofiber; CNF) โดยจะปรับปรุงเส้นใยนาโนเซลลูโลสด้วย Amino silane ซึ่งมาจากการใช้ 3-(2-aminoethylamino) propyldimethoxymethylsilane (AEAPDMS) โดยเริ่มต้นจะมีการใส่ AEAPDMS ลงไปในเอทานอล (Ethanol) จะได้เป็น Silane hydrolysate จากนั้นเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงในสารละลาย ซึ่งหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) บนพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส จะไปเชื่อมกับหมู่ฟังก์ชันซิลีนอล (Silanol group) ของ Silane hydrolysate จากนั้นนำไปกรอง โดยใช้สุญญากาศ (Vacuum filtration) หลังจกระบวนการกรองจะได้เป็นฟิล์ม A-CNF ที่มีความเป็นบวกสูงขึ้น เนื่องจาก Amino silane จาก AEAPDMS จะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (Amino group) เพิ่มมากขึ้นบนพื้นผิวของมัน เมื่อมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนมากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นขั้วบวกของวัสดุจะยิ่งแข็งแรงมากขึ้นและมีประจุที่ผิวเพิ่มมากขึ้นจากการเสียดสีสัมผัส และจะนำ A-CNF นี้ไปเป็นชั้นสัมผัสใน TENG ร่วมกับ fluorinated ethylene propylene (FEP) โดยในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (Output current) จาก 7 μA ไปเป็น 13.4 μA และค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Output voltage) จาก 159 V ไปเป็น 195 V

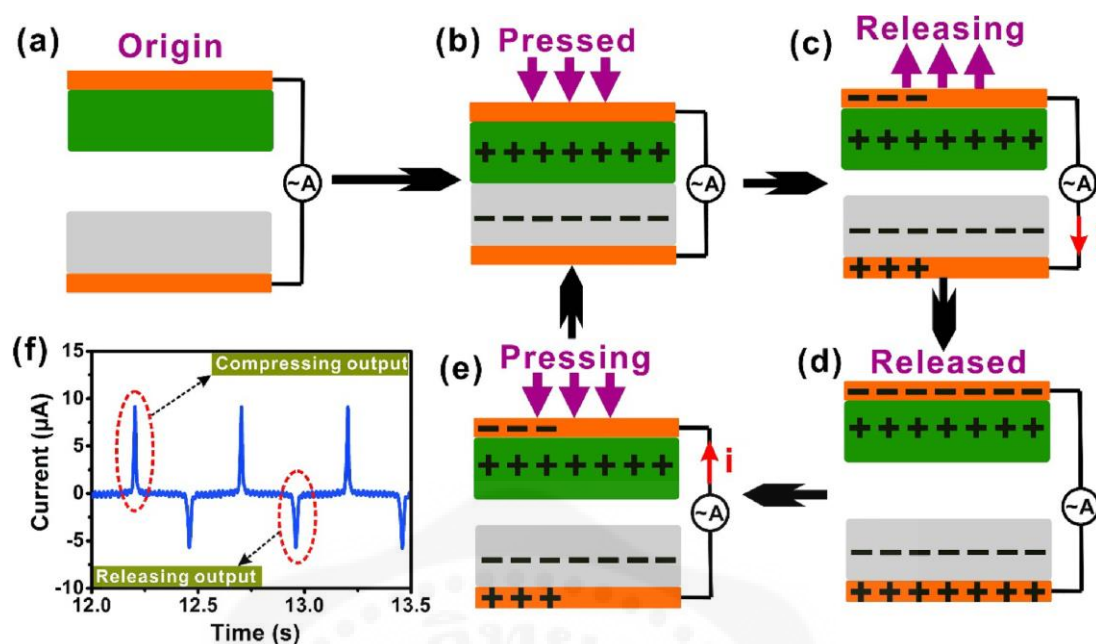


ภาพประกอบ 2.25 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม A-CNF [10]

และในปี 2021 S. Nie และคณะ [12] ยังได้มีการใช้วิธี Chemical functionalization เพื่อเพิ่มความมีขั้วบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose nanofiber) โดยการใช้ triethoxy-1H,1H,2H,2H-tridecafluoro-n-octylsilane (PFOTES) เพื่อปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลส ซึ่งเริ่มต้นจะมีการนำ PFOTES ใส่ลงไปในสารละลายเอทานอล (Ethanol) จะได้เป็น Silane hydrolysate จากนั้นจะมีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไปในสารละลาย ซึ่งหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลสจะไปเชื่อมกับ หมู่ฟังก์ชันซิเลนอล (Silanol groups) ของ silane hydrolysate จากนั้นนำไปกรองโดยใช้สุญญากาศ (Vacuum filtration) หลังจากจบกระบวนการกรองจะได้เป็นฟิล์ม PFOTES-CNF ซึ่งวิธีการปรับปรุงนี้จะทำให้เส้นใยนาโนเซลลูโลสมีความเป็นลบสูงขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงด้วยหมู่ซิเลนอลไปบนพื้นผิว จากนั้นนำไปเป็นชั้นสัมผัสใน TENG ร่วมกับฟิล์มพอลิเอไมด์ (Polyamide film) โดยในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า (Output current) สูงสุด ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) สูงสุด และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density) สูงสุดที่ $9.3 \mu\text{A}$, 28.5 V และ $1.35 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ

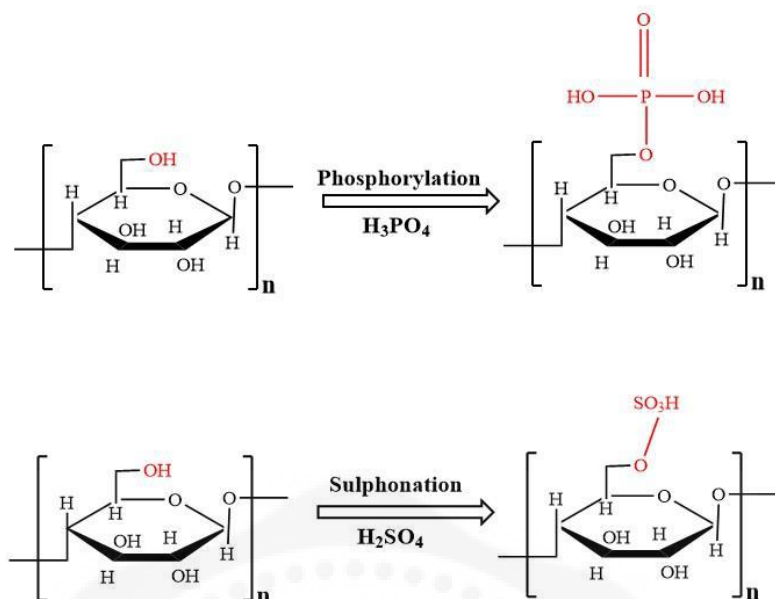


ภาพประกอบ 2.26 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม PFOTES-CNF [12]



ภาพประกอบ 2.27 กลไกการทำงานของ TENG ที่ใช้ฟิล์ม PFOTES-CNF [12]

นอกจากนี้ใน 2021 N. Boonchai และคณะ [9] ได้มีการใช้ปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชัน (Phosphorylation) และปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน (Sulfonation) มาปรับปรุงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติไทรโบอิเล็กทริกให้กับแบคทีเรียเซลลูโลส (Bacterial cellulose; BC) ในส่วนของปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชัน จะเริ่มต้นจากการนำ BC hydrogel จุ่มลงในสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethylformamide; DMF) จากนั้นหยดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ลงในสารละลายนั้นพร้อมกับให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน แล้วทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ในขั้นตอนนี้ หมู่ฟังก์ชันฟอสเฟต (Phosphate group) ในกรดฟอสฟอริกจะไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของ BC hydrogel ได้เป็น Phosphorylated BC (PBC) ในส่วนของปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน (Sulfonation) จะเริ่มต้นจากการนำ BC hydrogel จุ่มลงไปในสารละลาย Sodium periodate (NaIO_4) จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง แล้วแช่ลงในสารละลายโซเดียมไบซัลเฟต (Sodium bisulfate; NaHSO_3) ในขั้นตอนนี้ หมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิค (Sulfonic group) จะไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของ BC hydrogel ได้เป็น Sulfonated BC (SBC) หลังจากผ่านการปรับปรุงแล้ว จะนำไปทำเป็นชั้นสัมผัสใน TENG โดย PBC และ SBC จะสามารถเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (Output current) ได้จาก 4.96 μA ไปเป็น 6.35 μA และ 4.96 μA ไปเป็น 5.94 μA ตามลำดับ และสามารถเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Output voltage) ได้จาก 54.4 V ไปเป็น 76.7 V และ 54.4 V ไปเป็น 64 V ตามลำดับ

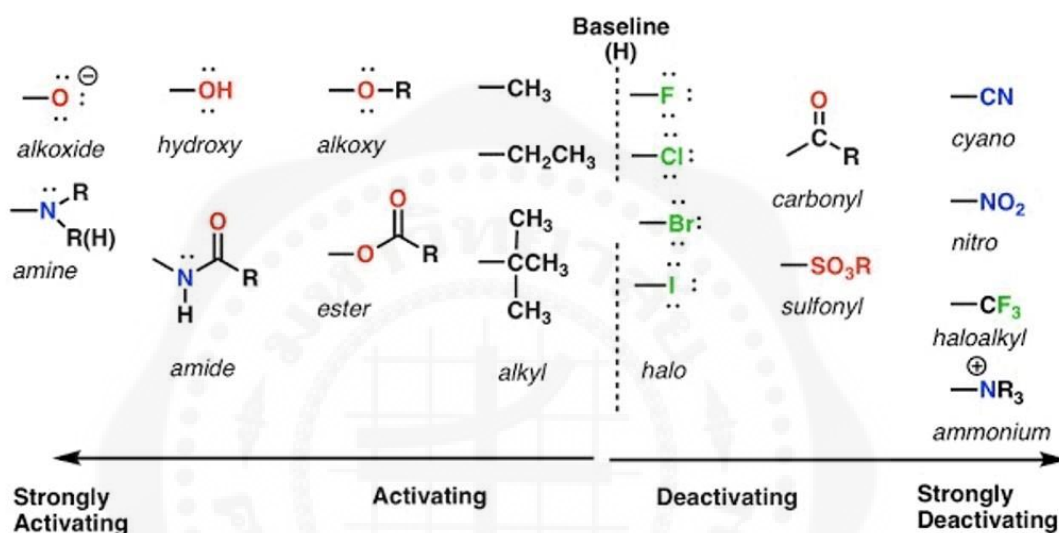


ภาพประกอบ 2.28 แสดงภาพปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชัน (Phosphorylation) และปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน (Sulfonation) บนแบคทีเรียเซลลูโลส (Bacterial cellulose; BC) [9]

แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการทั้งสองที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นวิธีการที่มีความยุ่งยาก และซับซ้อน มีตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเกิดหมู่ฟังก์ชันจำนวนมากเกินไป ทำให้ยากแก่การควบคุมคุณภาพ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวิธีการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า สามารถทำได้ง่าย และมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุกลุ่มผ้าและเส้นใยได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เป็น Textile-TENG ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมา ในปี 2019 D. Cezan และคณะ [20] ได้มีการนำเม็ดบีทพอลิเมอร์ใส่ลงในสีย้อมคูมาลีน พบว่าเมื่อสีย้อมและเม็ดบีทพอลิเมอร์สัมผัสกัน สีย้อมจะเกิดประจุไฟฟ้าขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมส่งผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ได้ ดังนั้น หากนำสีย้อมมาย้อมลงบนผ้าคอตตอนก็มีความเป็นไปได้ที่หมู่ฟังก์ชันของสีย้อมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของผ้าคอตตอนได้เช่นเดียวกัน ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจในการใช้สีย้อม ย้อมลงบนผ้าคอตตอนเพื่อให้หมู่ฟังก์ชันของสีย้อมไปติดบนผ้า เพื่อที่จะศึกษาผลที่เกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของผ้าคอตตอนที่เกิดจากสีย้อม

2.8 ปรากฏการณ์ Inductive Effect

ปรากฏการณ์ Inductive Effect เป็นผลกระทบที่เกิดจากการส่งประจุไฟฟ้าทั่วโซ่อะตอม นำไปสู่ประจุไฟฟ้าที่คงที่บนอะตอม โดยผลกระทบนี้จะเกิดขึ้น เมื่อมีความแตกต่างของค่า Electronegativity หรือ EN ของอะตอมของโมเลกุล โดยอะตอมที่มีค่า EN สูงกว่า จะมีแนวโน้มที่จะดึงดูดอิเล็กตรอนเข้าหาตัวเองมากกว่าอะตอมที่มีค่า EN ต่ำกว่า ดังภาพประกอบที่ 2.29 อะตอมที่มีค่า EN ต่ำกว่าจะได้รับประจุบวก ส่วนอะตอมที่มีค่า EN สูง จะได้รับประจุลบ ซึ่งจะเรียกสิ่งนี้ว่า “พันธะโพลาไรเซชัน (Polarization)”



ภาพประกอบ 2.29 แนวโน้มการให้และดึงดูดอิเล็กตรอนของอะตอมต่างๆ [58]

2.9 สีย้อม (Dye)

สีย้อม (Dye) หมายถึง สารให้สีที่อยู่ในขณะที่ยังไม่ถูกนำไปใช้งาน จะมีสมบัติละลายน้ำได้หรืออาจละลายไม่ได้ แต่เมื่อนำไปย้อมโมเลกุลของสีย้อมจะซึมผ่านไปในเส้นใย และสามารถเกาะติดกับเส้นใยได้อย่างดีด้วยวิธีการต่างๆ ทำให้เส้นใยที่มีความสามารถในการรับสีย้อม และได้สีที่เปลี่ยนแปลงไปจากสีเส้นใยเริ่มต้น โดยสามารถจำแนกประเภทสีย้อมได้หลากหลายวิธี

2.9.1 จำแนกตามแหล่งที่มาของสีย้อม สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ สีย้อมจากธรรมชาติ และสีย้อมสังเคราะห์

2.9.1.1 สีย้อมจากธรรมชาติ เป็นสีที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น พืชและแร่ธาตุ ทำให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ และไม่ส่งผลกระทบหรือความเป็นพิษเมื่อนำไปใช้กับ

ร่างกายมนุษย์ เมื่อนำสีย้อมธรรมชาติไปย้อมเส้นใยหรือสิ่งทอ จะได้สีที่ไม่เข้ม มีความชัด เมื่อโดนแสงแดด จะทำให้สีบนเส้นใยจางลง โดยสีย้อมธรรมชาติจากพืชมีความนิยมนำมาใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด เพราะพืชสามารถนำส่วนต่าง ๆ เกือบทุกส่วนมาทำเป็นสีย้อมได้ ตัวอย่างของสีย้อมธรรมชาติ เช่น สีย้อมจากอัญชัน ขมิ้น ใบไม้ต่าง ๆ ซึ่งก็จะได้สีที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้เพื่อให้ได้สีย้อมที่มีความแปลกใหม่ หรือเฉดสีเพิ่มเติมที่ต้องการ สามารถนำพืชหลายๆชนิดมารวมกัน เช่น ใบแคสตรวมกับขมิ้นผง จะให้สีย้อมออกมาเป็นสีทองอ่อน

2.9.1.2 สีย้อมสังเคราะห์ เป็นสีย้อมที่มีแหล่งที่มาจากการนำเอาสารเคมีต่าง ๆ มาสังเคราะห์ หรือ มาทำปฏิกิริยากัน มีความหลากหลายในเฉดสีและคุณภาพของสี โดยเมื่อนำสีย้อมสังเคราะห์ไปย้อมเส้นใยหรือสิ่งทอ จะได้สีที่เข้มเมื่อใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ทำให้มีความสะดวกในการใช้งาน เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้ มีเนื้อสีเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณที่เข้มข้นมาก แต่สีย้อมสังเคราะห์มีข้อจำกัดในเรื่องของการส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เพราะอาจก่อให้เกิดมลพิษและอาจเกิดสารเคมีตกค้าง เมื่อนำไปใช้กับร่างกายมนุษย์ นอกจากนี้ น้ำที่เหลือจากกระบวนการย้อมสีด้วยสีย้อมสังเคราะห์ จะต้องกำจัดให้ถูกวิธีเพราะสารเคมีที่อยู่ในสีย้อมจะทำให้ทั้งดินและน้ำเสีย และอาจก่ออันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ดังนั้นในบางประเทศจึงจัดทำกฎหมายอย่างเคร่งครัด เกี่ยวกับการนำเข้าของสีย้อม เพื่อให้ผู้ใช้งานมีการใช้งานได้อย่างเหมาะสม ไม่ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

สีย้อมยังสามารถจำแนกประเภทตามการนำไปใช้กับเส้นใย โดยจะแบ่งเป็นสีย้อมที่ใช้สำหรับเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ เพื่อให้สามารถทำการเลือกสีย้อมที่มีความเหมาะสมและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย้อมที่ดี

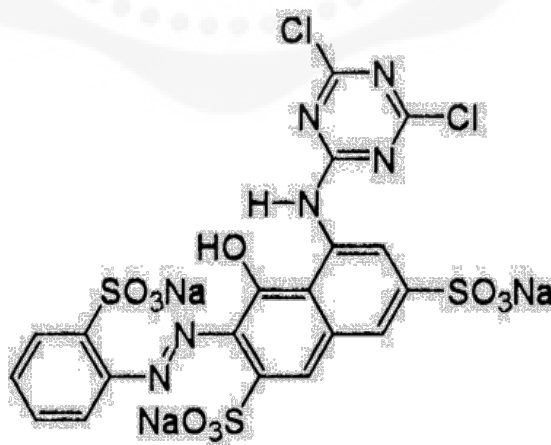
2.9.2 จำแนกตามการนำไปใช้ของสีย้อม สีย้อมยังสามารถจำแนกประเภทตามการนำไปใช้กับเส้นใย โดยจะแบ่งเป็นสีย้อมที่ใช้สำหรับเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ เพื่อให้สามารถทำการเลือกสีย้อมที่มีความเหมาะสมและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย้อมที่ดี

2.9.2.1 สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) คือ สีย้อมที่มีสามารถละลายน้ำและนำไปย้อมได้ง่ายในหลากหลายวิธี เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยาเกิดพันธะทางเคมีกับเส้นใยในสถานะที่เหมาะสมได้ เมื่ออยู่ในน้ำย้อมสีย้อมจะแสดงความเป็นด่างและมีสมบัติเป็นแอนไอออน สีย้อมชนิดนี้มีคุณสมบัติในการทำเส้นใยมีความคงทนต่อการซักสูง มีเฉดสีที่หลากหลายและสีที่เข้มสด มีราคาที่เหมาะสม ไม่แพงจนเกินไป นอกจากนี้สีรีแอคทีฟเหมาะสำหรับการนำไปย้อมสีกับเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด โดยโมเลกุลของสีย้อมจะไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยเซลลูโลสที่มีหมู่ฟังก์ชันหลัก คือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และเชื่อมโยงติดกับหมู่ฟังก์ชันด้วยพันธะโควาเลนต์ จนกลายเป็นสารประกอบเคมียึดติดกับเส้นใย

โครงสร้างทางเคมีของสียรีแอคทีฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.30 ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีสี (Chromophore) และส่วนที่ทำปฏิกิริยา (Reactive Group) โดยโครงสร้างของส่วน Chromophore จะมีความคล้ายกับโมเลกุลของสีย้อมทั่วไป ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสียอะโซ (Azo) และแอนทราควิโนน (Anthraquinone) ในส่วน Reactive group จะสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ส่วน นั่นคือ ส่วนโครงสร้างหลักของกลุ่มทำปฏิกิริยา ส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมกับส่วนที่มีสี และส่วนที่เป็นกลุ่มที่จะหลุดออกเมื่อสีย้อมทำปฏิกิริยากับเส้นใย ซึ่งโครงสร้างทางเคมีทั้งสองส่วนนี้เอง เป็นสาเหตุที่ทำให้ให้สียรีแอคทีฟมีสมบัติที่พิเศษ หลากหลายและมีความแตกต่างกันได้มากมาย โดยสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพันธะทางเคมีกับเส้นใยในสภาวะที่เหมาะสมได้ ซึ่งลักษณะของปฏิกิริยาของสียรีแอคทีฟที่เกิดกับเส้นใย มี 2 ลักษณะ คือ

1. ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดพันธะแบบเอสเตอร์ (Nucleophilic Substitution Reaction) เป็นการทำปฏิกิริยากับเส้นใยที่มีโครงสร้างเป็นวง สียรีแอคทีฟที่เกิดปฏิกิริยาแบบนี้ จะสามารถซักล้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยน้ำสบู่ที่มีความเป็นด่าง
2. ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดพันธะแบบอีเธอร์ (Nucleophilic Addition Reaction) เป็นการทำปฏิกิริยากับเส้นใยที่มีโครงสร้างของกลุ่มปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นแนวตรง สียรีแอคทีฟที่เกิดปฏิกิริยาแบบนี้ ต้องทำการซักล้างด้วยน้ำสบู่ที่เป็นกลาง เพราะสีย้อมอาจทำปฏิกิริยากับเส้นใยและทำให้สีย้อมหลุดออกจากเส้นใยได้

สมบัติที่สำคัญของการย้อมสียรีแอคทีฟ คือ ความว่องไวต่อปฏิกิริยาของกลุ่มทำปฏิกิริยา ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยในเรื่อง โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ และความเป็นด่าง โดยเมื่อโครงสร้างทางเคมี อุณหภูมิ และความเป็นด่างมีความแตกต่างกัน จะส่งผลให้ระดับความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยานั้นมีความแตกต่างกันด้วย

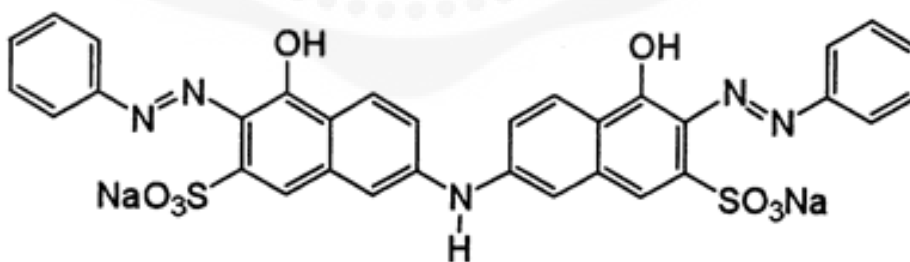


ภาพประกอบ 2.30 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสียรีแอคทีฟ (Reactive dye) [48]

2.9.2.2 สีย้อมตรง (Direct Dye) เป็นสีย้อมที่มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลลักษณะเรียวยาว มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีหมู่กรดซัลโฟนิค สีย้อมชนิดนี้นิยมนำมาใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งก็คือเส้นใยเซลลูโลส จึงมักถูกเรียกว่า สีย้อมคอตตอน สีย้อมจะยึดติดเส้นใยเมื่อทำการย้อม โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาล โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมตรง จะแสดงดังภาพประกอบ 2.31 โดยกลุ่มของสีย้อมตรง สามารถแบ่งเป็น 7 กลุ่มย่อย ได้แก่

1. Monoazo สีย้อมกลุ่มนี้มีพันธะอะโซ 1 ตำแหน่ง ภายในโมเลกุล
2. Bisazo สีย้อมกลุ่มนี้มีพันธะอะโซ 2 ตำแหน่ง ภายในโมเลกุล
3. Triazo สีย้อมกลุ่มนี้มีพันธะอะโซ 3 ตำแหน่ง ภายในโมเลกุล
4. Polyazo สีย้อมกลุ่มนี้มีพันธะอะโซมากกว่า 3 ตำแหน่ง ภายในโมเลกุล
5. Stilbene สีย้อมกลุ่มนี้มีหมู่ของ Stilbene อยู่ภายในโมเลกุล
6. Thiazole สีย้อมกลุ่มนี้มีอะตอมของไนโตรเจนเกาะอยู่ในตำแหน่งที่ 3 ของวงเบนซีนมีโครงสร้างจัดอยู่ในกลุ่ม heterocyclic amines
7. Phthalocyanine สีย้อมกลุ่มนี้มีโครงสร้างของโมเลกุลประกอบไปด้วยโมเลกุลของ phthalic acid ที่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของ cyanine

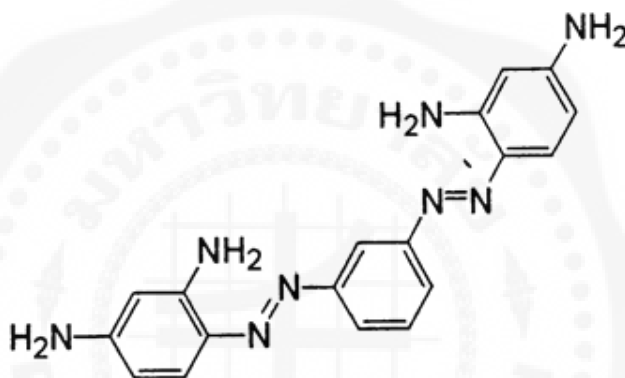
วิธีการย้อมสีย้อมตรงที่ไม่ยุ่งยาก ใช้เพียงสารช่วยย้อมชนิดเดียว นั่นคือ เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โดยการที่สีย้อมตรงยึดติดกับเส้นใยได้ เกิดจากแรงดึงดูดจำนวนมากของพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาล แต่เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง ประกอบกับสมบัติที่ละลายน้ำ



ภาพประกอบ 2.31 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมตรง (Direct dye) [49]

2.9.2.3 สีเบสิค (Basic Dye) เป็นสีย้อมที่เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ มีโครงสร้างโมเลกุล ดังแสดงในภาพประกอบ 2.32 นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยสังเคราะห์ได้ดี มีคุณสมบัติที่สามารถละลายน้ำได้ โดยเมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก ซึ่งส่วนที่เป็นประจุบวกของสีย้อมนี้ จะเป็นส่วนที่เกิดพันธะกับเส้นใย แต่ในทางกลับกันเมื่อนำไปย้อมในเส้นใยเซลลูโลส จะติดได้เพียงเล็กน้อย จึงต้องทำการย้อมด้วยสารช่วยติด (mordant) ก่อน ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถก่อตัวเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีย้อม เพื่อทำหน้าที่เป็นเหมือนสะพานเชื่อมระหว่างตัวสีกับเส้นใย

ลักษณะเด่นของสีเบสิค คือ สีกลุ่มนี้ มีความสดใสสูง แต่มีความคงทนต่อแสงต่ำ การละลายของสีย้อมชนิดนี้ จะสามารถละลายน้ำได้ แต่จะละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะมีความเป็นพิษสูง



ภาพประกอบ 2.32 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสีเบสิค (Basic dye) [50]

2.10 การย้อมสี

การย้อมสีถือเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและถือเป็นการช่วยเพิ่มคุณค่าให้กับผ้า ทำให้ผ้าเหล่านั้นมีความสวยงาม น่าใช้งานมากยิ่งขึ้น การย้อมสีโดยทั่วไปมักจะใช้น้ำเป็นสื่อหลัก และใยผ้าแต่ละชนิดที่เมื่ออยู่ในน้ำก็จะเกิดการพองตัวออกตามปริมาณหมู่ฟังก์ชัน -OH ที่มีอยู่ โมเลกุลของสีจึงจะซึมเข้าไปได้ง่าย แต่เนื่องจากเส้นใยแต่ละชนิดมีจำนวนและขนาดของเส้นใย หรือ ขนาดโมเลกุลของสีที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้เส้นใยบางชนิดย้อมแล้วติดสีได้ดี บางชนิดติดสีไม่ได้ นอกจากนี้ การรวมตัวกันของสีและเส้นใยจะต้องมีมากกว่าการรวมตัวกันของน้ำและสี จึงจะทำให้ย้อมได้ดี โดยการที่การรวมตัวกันของสีและเส้นใยจะเกิดขึ้นได้ดั่งนั้น จะเกิดเมื่อโมเลกุลของสีมีหมู่อะตอมเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดภาวะดูดติดกับเส้นใย แล้วเกิดอิทธิพลทางเคมีที่ยึดกันแน่น โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond), แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van de Waals force), แรงไอออนิก (Ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

2.10.1 กลไกการดูดติด

การดูดติดเป็นกระบวนการที่ทำให้สารละลายหรือสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กมาติดบนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งการดูดติดจะเป็นการดูดติดระหว่างสถานะทั้งสาม ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งอาจจะมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของแข็ง, ของเหลว-ของเหลว หรือ ก๊าซ-ของเหลว เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่แบบของเหลว-ของแข็ง เนื่องจากจะเป็นการย้อมสีบนผ้าคอตตอน ซึ่งสารละลายหรือของเหลวที่จะไปติดที่ผิวของแข็ง เรียกว่า สารถูกดูดติด (Adsorbate) และของแข็งที่จะถูกเกาะติดด้วยของเหลว เรียกว่า สารดูดติด (Adsorbent) สำหรับการดูดติดจากของเหลวมายังของแข็งจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

2.10.1.1 Lyophobic of Solution เป็นการที่ตัวถูกละลายไม่ชอบอยู่ในของเหลว ถ้ากรณีที่เป็นน้ำอย่างที่เราพบกันทั่วไป จะเรียกว่า ไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) สารไฮโดรโฟบิกนี้จะพยายามพาตัวเองเข้าสู่ชั้นที่อยู่ระหว่างน้ำกับของแข็ง และติดที่ผิวของแข็งในที่สุด

2.10.1.2 High Affinity of Solution to Solid เป็นความชอบของตัวถูกละลายที่จะไปติดที่ผิวของสารดูดติด ซึ่งจะอาศัยแรง 3 ประการ ได้แก่

1. แรงดึงดูดทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีลักษณะแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนจะมีประจุอยู่ ซึ่งจะสามารถที่จะไปติดอยู่กับโมเลกุลของสารอื่นได้
2. แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นการดูดติดทางกายภาพ การดูดติดนี้จะเกิดขึ้นได้ดีในที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาสามารถย้อนกลับได้หรือสามารถคายสารได้
3. แรงทางเคมี จะมีลักษณะคือ สารที่ถูกดูดติดจะทำปฏิกิริยาเคมีกับสารดูดติด การดูดติดนี้จะเกิดขึ้นได้ดีในที่อุณหภูมิสูง

2.10.2 ขั้นตอนการย้อมผ้า

โดยทั่วไปจะมีขั้นตอนการย้อมผ้า 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ

2.10.2.1 การเตรียมผ้า การเตรียมผ้าที่มีประสิทธิภาพดีนั้น จำเป็นต้องกำจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนที่ติดมากับเส้นใยก่อน ขั้นตอนนี้จะเรียกว่า “การเตรียมผ้า (Pretreatment)” ในขั้นตอนการเตรียมผ้าจะแยกออกเป็นขั้นตอนย่อยอีก 2 ขั้นตอน

1. การทำความสะอาด (Scouring) จะเป็นการกำจัดสิ่งสกปรก คราบไขมันที่ติดอยู่บนผิวของผ้าให้สะอาด โดยจะใช้สารละลายต่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) และ โซดาแอช (Na_2CO_3) เพื่อทำให้เส้นใยดูดซับน้ำดีขึ้น ย้อมสีง่ายขึ้น สีดิดได้ดีและมีความสม่ำเสมอ
2. การฟอกขาว (Bleaching) เป็นการกำจัดสีธรรมชาติออกจากเส้นใยของผ้า

2.10.2.2 การย้อมผ้า การย้อมผ้าทั่วไปจะมี 2 ประเภท ได้แก่ การย้อมร้อน และการย้อมเย็น

1. การย้อมร้อน คือ การย้อมผ้าในอ่างย้อมที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C
2. การย้อมเย็น คือ การย้อมที่อุณหภูมิประมาณ 50 °C

หลังจากที่ได้ศึกษาขั้นตอนการเตรียมผ้า และการย้อมผ้า จะทำการเตรียมตัวอย่าง โดยเตรียมผ้า คอตตอน และย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีย้อมชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผ้าคอตตอนทั้งก่อนและหลังการย้อมสี ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) และตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน เพื่อศึกษาเอกลักษณ์ของผ้าคอตตอน ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy; FTIR) ทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างผ้ากาวและท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT) ด้วยเทคนิค X-ray Tomographic Microscopy (XTM) ทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคอมโพสิตระหว่างผ้ากาวและCNT ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy) เมื่อนำผ้าคอตตอนที่ย้อมสี ไปประดิษฐ์เป็น Cotton-based TENG จะทำการตรวจสอบผลของสีย้อมที่เกิดขึ้นต่อค่าไดอิเล็กทริก ด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter) และค่าการส่งออกจากไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้า (Output power) ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)

2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

Scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.33 เครื่อง SEM มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM โดยเครื่อง SEM จะมีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร สำหรับตัวอย่างที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ การเตรียมตัวอย่างไม่จำเป็นที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับแบบดูด้วยเครื่อง TEM เพราะเครื่อง SEM ไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง การสร้างภาพของเครื่องนี้ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

2.11.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เครื่อง SEM จะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน โดยสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะต้องปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกแล้วแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป จากนั้นจึงจะสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้



ภาพประกอบ 2.33 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) [51]

2.11.2 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับวัตถุ

2.11.2.1 สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image; SEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ เกิดที่พื้นผิวระดับไมล์ (ไม่เกิน 10 นาโนเมตร) เป็นสัญญาณที่ถูกใช้นำมาสร้างภาพ มีการใช้งานแพร่หลายมากที่สุด

2.11.2.2 สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image; BEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดการกระเจิงมุมสูง (มากกว่า 90 องศา) สูญเสียพลังงานให้กับ

อะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน และกระเจิงกลับออกมา อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับจะมีพลังงานสูงกว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยจะเกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร และเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ซึ่งสัญญาณภาพที่ได้จะมีการแสดงความต่างระหว่างเลขอะตอมเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่บนผิวชิ้นงาน

2.11.2.3 สัญญาณภาพจากรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Image; XRI) รังสีเอ็กซ์มีลักษณะเฉพาะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M,...) และถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร ทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอม โดยอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ จากนั้นพลังงานส่วนเกินจะปลดปล่อยออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะมีความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุ ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

2.12 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ใช้วิเคราะห์จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิดช่วงกลาง (Middle infrared region) ช่วงความยาวคลื่น (l) 2.5 - 50 mm และ ช่วงเลขคลื่น 4000 - 400 cm^{-1} เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Nondestructive) นั้นหมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างหลังการวัด นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่สะดวก ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการวัดสั้น และมีความปลอดภัยสูง สามารถวัดตัวอย่างได้ทั้งในรูปของแข็งและของเหลว

2.12.1 กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด FTIR Micro-Spectrometer

กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด เป็นเครื่องมือวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด (IR) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสาร ดังแสดงในภาพประกอบ 2.34 โดยเป็นเครื่องมือที่พัฒนามาจากเครื่อง IR Spectrophotometer ซึ่งมีการใช้ระบบทางเดินแสงแบบ Interferometer แทนระบบทางเดินแสงแบบเก่า ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น มีความไวในการวิเคราะห์มากขึ้นและใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยลง สามารถวัดได้ทั้งแบบการส่องผ่าน (Transmission) และการสะท้อน (Reflection) มีตัวตรวจวัดรังสีอินฟราเรด 2 ชนิด คือ

1. MCT detector วัดตัวอย่างได้ครั้งละ 1 สเปกตรัม
2. Focal Plane Array (FPA) detectors สามารถวัดสเปกตรัมสูงสุดได้ครั้งละ 4,069 สเปกตรัม จึงทำให้การสร้างแผนภาพการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันได้รวดเร็วกว่า MCT detector

2.12.2 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด FTIR Micro-Spectrometer

กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด อาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรด (Middle infrared region) ประมาณ $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรด ที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือ การหมุน (Bending) ของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุล จะทำให้โมเลกุลดังกล่าวเกิดการดูดกลืนแสง IR และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น (Wave number) ได้เป็นสเปกตรัมที่เรียกว่า “Interferogram” ตัวอย่างการวิเคราะห์ เช่น

- Polymer analysis
- Lubricant formulation and fuel additives
- Foods research
- Environmental and water quality analysis methods
- Biochemical and biomedical research
- Coatings and surfactants



ภาพประกอบ 2.34 กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด FTIR Micro-Spectrometer [52]

2.13 เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive) และไม่ต้องสัมผัสสารโดยตรง นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสาร โดยอาศัยหลักการทางแสง โดยที่สารแต่ละตัวจะมีลักษณะการกระเจิงแสงไม่เหมือนกัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.35

2.13.1 หลักการทำงานของรามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

การวิเคราะห์โดย Raman spectroscopy อาศัยหลักการกระเจิงของแสงที่เกิดจากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลของสารสมมติ โดยเมื่อให้แสง laser ความยาวคลื่นหนึ่งผ่านสารของเหลวที่โปร่งแสง จะมีอนุภาคแสงจำนวนหนึ่งที่ทะลุผ่านไป ในขณะที่บางส่วนจะชนเข้ากับโมเลกุลสารแล้วเกิดการเปลี่ยนทิศทาง ในการชนกัน โดยส่วนมากนั้น พลังงานของแสงหลังการชนจะไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า Rayleigh scattering เป็นการชนแบบยืดหยุ่น แต่จะมีอนุภาคแสงส่วนน้อยที่พลังงานหลังการชนเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานกับโมเลกุลของสาร เรียกว่า เป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น โดยแสงอาจมีความถี่มากขึ้นหรือน้อยลงก็ได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานหลังเกิดการชนนี้เรียกว่า Raman scattering



ภาพประกอบ 2.35 เครื่องรามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) [53]

2.13.2 การประยุกต์ใช้งานเครื่องเอกซเรย์ดิแฟร็กโทมิเตอร์

1. นำไปใช้งานในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) และไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Microelectronic) ในการตรวจสอบโครงและคุณภาพในการเคลือบชิ้นงาน เช่น การหาคาร์บอนแข็ง
2. สามารถนำมาวิเคราะห์สารที่มีสีดำ เช่น ผงเขม่าดำ หรือตัวอย่างที่มีสีเข้มได้
3. ใช้ในการตรวจสอบเส้นทางธรณีวิทยาและการทดสอบอัญมณีต่างๆ เช่น เพชร เป็นต้น
4. สามารถนำไปตรวจสอบด้านนิติเวชศาสตร์ เช่น การตรวจสอบสิ่งเสพติด สารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตสิ่งเสพติด เป็นต้น

2.14 เทคนิค X-ray Tomographic Microscopy (XTM)

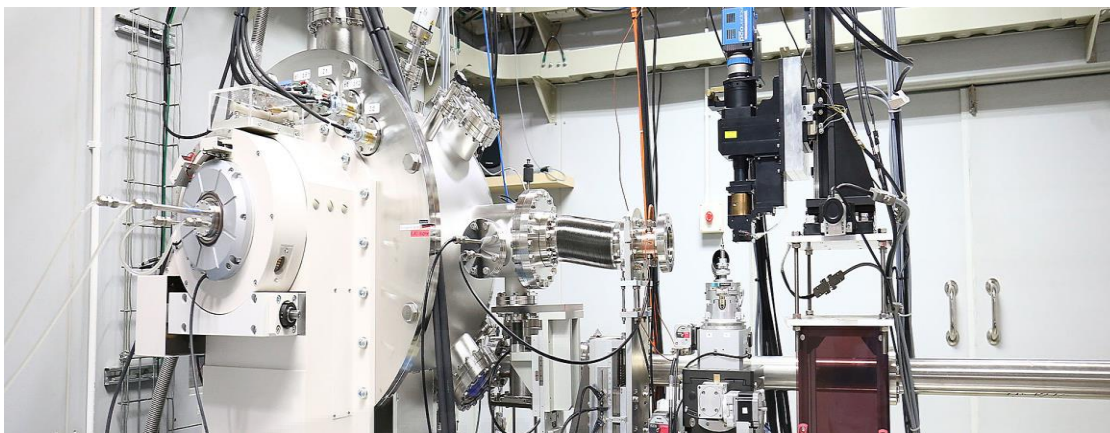
เทคนิค X-ray Tomographic Microscopy (XTM) เป็นการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างผ่านกล้องจุลทรรศน์ด้วยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน ชุดข้อมูลภาพที่บันทึกในระหว่างที่วัตถุตัวอย่างกำลังหมุน เมื่อนำภาพที่บันทึกได้ในแต่ละมุมมาประมวลเข้าด้วยกันจะสามารถแสดงภาพสามมิติซึ่งเผยให้เห็นถึงโครงสร้างภายในของวัตถุตัวอย่างได้อย่างละเอียดถึง 0.001 - 0.005 mm เทคนิคนี้จะสามารถวิเคราะห์โดยไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง จึงสามารถนำมาใช้ในงานวิจัยทางการแพทย์ ภาควิทยาศาสตร์ และทางวิทยาศาสตร์ เช่น งานวิจัยทางโครงสร้างกระดูก งานพัฒนาวัสดุทดแทนกระดูก งานพัฒนาวัสดุสังเคราะห์ทางอุตสาหกรรมอื่นๆ และงานศึกษาทางธรณีวิทยา เป็นต้น ดังภาพประกอบที่ 2.36

2.14.1 หลักการทำงานของ XTM

เทคนิค X-ray Tomographic Microscopy (XTM) เป็นเทคนิคที่ใช้ลำแสงเอกซเรย์ที่สร้างขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนในการถ่ายภาพเอกซเรย์ ซึ่งเมื่อฉายรังสีเอกซ์ไปยังชิ้นงานตัวอย่าง รังสีเอกซ์ที่ผ่านตัวอย่าง จะสร้างรูปแบบเอกซเรย์จากการดูดกลืนที่แตกต่างกันของตัวอย่างเพื่อให้ได้ภาพเอกซเรย์ จากนั้นจึงขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ระหว่างเลนส์ใกล้วัตถุ และทำการบันทึกด้วยกล้องความละเอียดสูง

โดยทั่วไปแล้ว เทคนิค XTM จะรับภาพจากรังสีเอกซ์รอบๆ ตัวอย่าง อย่างน้อย 180 องศา (หากตัวอย่างมีขนาดใหญ่กว่าขอบเขตการมองเห็นของระบบการตรวจจับ จะต้องทำการสแกนหลายครั้ง) หลังจากการสแกนแล้ว ภาพเอกซเรย์ทั้งหมดจะถูกปรับโดยการแก้ไขค่าความสว่างและความมืด เพื่อลบเอฟเฟกต์ที่เกิดจากความแปรผันของความไวแสงแบบพิกเซลต่อพิกเซลของกล้องและการบิดเบือนในเส้นทางแสง ภาพเอกซเรย์ที่ได้จะถูกป้อนเข้าไปในคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลให้ได้ภาพซีโน

แกรมและภาพเอ็กซเรย์ที่สร้างขึ้นใหม่ โดยใช้อัลกอริธึมการฉายภาพด้านหลังที่ผ่านกรองแล้ว ภาพที่สร้างขึ้นใหม่ จะเรียกว่า “โทโมแกรม” ซึ่งจะสะท้อนถึงรายละเอียดหน้าตัดของตัวอย่างในสามมิติ



ภาพประกอบ 2.36 เครื่อง X-ray Tomographic Microscopy [54]

2.15 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดคลื่นไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความถี่ของสัญญาณ เฟสของสัญญาณ และคาบเวลา ดังแสดงในภาพประกอบ 2.37 ผลที่ได้หลังจากใช้ออสซิลโลสโคปจะแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟ ซึ่งแนวแกนตั้งจะเป็นค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ โวลต์ (Volt), แอมแปร์ (Ampere) และ โอห์ม (Ohm) ส่วนแนวแกนนอนจะเป็นเวลา อุปกรณ์นี้ทำให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์แนวโน้มทิศทางของสัญญาณว่าจะออกไปในทิศทางใด นอกจากนี้ ออสซิลโลสโคปยังถูกนำไปประยุกต์ใช้กับค่าพารามิเตอร์ทางด้านกายภาพ เช่น การสั่น และความดังของเสียง เป็นต้น แต่หากจะใช้กับค่าพารามิเตอร์ทางด้านกายภาพจะต้องใช้ Transducer เป็นตัวแปลงค่าเหล่านั้นเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าก่อน



ภาพประกอบ 2.37 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) [53]

2.15.1 ประเภทของออสซิลโลสโคป

โดยทั่วไปห้องปฏิบัติการจะมีการใช้ออสซิลโลสโคปอยู่ 2 แบบ คือ แบบอะนาล็อก (Analog) และแบบดิจิทัล (Digital)

1. Analog จะไม่สามารถอ่านค่าทางการวัดออกมาเป็นตัวเลขได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.38

2. Digital จะสามารถอ่านค่าทางการวัดได้เองอัตโนมัติ เช่น ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ความถี่ (Frequency) และคาบเวลา (Period) เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.39



ภาพประกอบ 2.38 ออสซิลโลสโคปแบบอะนาล็อก (Analog oscilloscope) [55]



ภาพประกอบ 2.39 ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล (Digital oscilloscope) [56]

2.15.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

1. Cathode ray tube หรือ CRT ส่วนแสดงผลของสัญญาณออกเป็นรูปคลื่นต่างๆ โดยการสร้างลำอิเล็กตรอนปล่อยให้ไปกระทบสารเรืองแสงที่เคลือบผิวด้านในจอภาพ จนเกิดเป็นลำแสงขึ้น

2. Vertical amplifier ส่วนขยายสัญญาณให้เหมาะสมกับการแสดงผล เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าไปเบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอน

3. Delay line ตัวหน่วงสัญญาณอินพุตในแนวตั้งก่อนที่จะป้อนเข้าแผ่นเพลตป้ายเบนทางแนวตั้ง
 4. Time base generator ส่วนควบคุมสัญญาณรูปฟันเลื่อยก่อนป้อนข้อมูลให้กับสัญญาณทางแนวนอน
 5. Horizontal amplifier ส่วนขยายสัญญาณรูปฟันเลื่อยก่อนป้อนข้อมูลผ่านทางแผ่นเพลตป้ายเบนทางแนวนอน
 6. Trigger circuit ส่วนที่ทำให้สัญญาณแนวนอนและสัญญาณแนวตั้งทำงานพร้อมกัน
- Power supply ส่วนจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องออสซิลโลสโคป

2.15.3 หลักการทำงานของออสซิลโลสโคป

เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามา สัญญาณนั้นจะถูกส่งผ่านส่วนควบคุมสัญญาณแนวตั้ง ซึ่งประกอบด้วยวงจรที่สำคัญ 2 วงจร คือ วงจรลดทอนสัญญาณ (Vertical attenuator) และวงจรขยายสัญญาณทางแนวตั้ง (Vertical amplifier) จากนั้นจะถูกป้อนเข้าสู่แผ่นเบี่ยงเบนทางแนวตั้ง เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอนในแนวตั้งต่อไป

ส่วนควบคุมสัญญาณแนวนอน ทำหน้าที่เป็นตัวผลิตสัญญาณรูปฟันเลื่อย ซึ่งประกอบด้วยวงจรที่สำคัญ คือ วงจรกำเนิดความถี่การกวาด หรือ Time base generator ซึ่งสัญญาณรูปฟันเลื่อยจะถูกป้อนไปยังแผ่นเบี่ยงเบนทางแนวนอน ทำให้ลำอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนหรือกวาดในแนวนอน ถ้าความถี่ของสัญญาณรูปฟันเลื่อยไม่สัมพันธ์กับสัญญาณที่ต้องการจะดู จะทำให้ได้รูปคลื่นของสัญญาณที่ไม่ซ้อนทับกันและไม่นิ่ง แต่ถ้าสามารถปรับความถี่การกวาดให้ตรงกันได้ ก็จะได้รูปคลื่นที่นิ่ง วิธีการนี้เรียกว่า การเข้าจังหวะ หรือ Synchronization

2.16 เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter)

LCR Meter หรือ เครื่องวัดอุปกรณ์พาสซีฟ เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในงานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิดตั้งแต่งานกำลังสูงด้านพาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์จนถึงงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กและซับซ้อน ดังแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 2.40 ซึ่งปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์แบบยึดติดผิว หรือ SMD (Surface Mount Device) ที่มีขนาดของตัวอุปกรณ์เล็กลงเรื่อย ๆ จนแทบมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า



ภาพประกอบ 2.40 เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter) [57]

2.16.1 หลักการพื้นฐานของเครื่องวัดแอลซีอาร์

มิเตอร์วัดค่า LCR มีหลากหลายแบบตั้งแต่แบบง่าย ๆ ที่ใช้การวัดค่าอิมพีแดนซ์แล้วแปลงเป็นค่าความเหนี่ยวนำหรือความจุไฟฟ้า และแบบที่ซับซ้อนที่จะใช้ในการวัดค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุได้โดยตรง และยังสามารถวัดค่าความต้านทานอนุกรมแฝงและค่า Q แฟกเตอร์ของอุปกรณ์เหนี่ยวนำได้ ทำให้ทราบได้ถึงสมรรถนะหรือคุณภาพโดยรวมของตัวอุปกรณ์ได้โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่อุปกรณ์ที่กำลังทดสอบ

เครื่องวัด LCR จะทำการวัดค่าแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร โดยจะคำนวณได้จากอัตราส่วนของปริมาณทั้งสองนั้น เครื่องวัด LCR แบบดิจิทัล ใช้หลักการวัดอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่กำลังทดสอบโดยการวัดแรงดันตกคร่อม (V), กระแสที่ไหลผ่าน (I) และมุมเฟสที่แตกต่างระหว่างแรงดันและกระแส ซึ่งจะได้ค่าค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ทั้งหมดจากค่าทั้ง 3 แฟกเตอร์นี้

2.16.2 เทคนิคการใช้งานเครื่องวัดแอลซีอาร์

1. วัดค่าที่ความถี่ใช้งาน โดยเลือกความถี่ทดสอบที่ใกล้เคียงความถี่ที่อุปกรณ์นั้นใช้งานให้มากที่สุด จะช่วยลดผลของ stray effects หรือค่าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่
2. ปรับความแรงสัญญาณทดสอบ เช่นเดียวกับการเลือกความถี่ให้ใกล้เคียงความถี่ใช้งานมากที่สุด ระดับสัญญาณทดสอบก็เช่นกัน เนื่องจากค่าของอุปกรณ์อาจเปลี่ยนแปลงตามความแรงสัญญาณที่จ่ายโดยเฉพาะตัวเหนี่ยวนำที่มีแกน
3. ผลจากความยาวของขาอุปกรณ์ ความยาวของขาอุปกรณ์จะมีผลกระทบที่ความถี่สูงกว่า 1 MHz โดยมีค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 10 nH ต่อเซนติเมตร
4. คายประจุก่อนวัดค่า ตัวเก็บประจุบางตัวอาจยังมีประจุไฟฟ้าค้างอยู่ จึงควรทำการคายประจุตัวเก็บประจุก่อนการวัดค่าทุกครั้ง

2.17 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM)

มัลติมิเตอร์ (Multimeter) เป็นเครื่องมือวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่รวมเอาทั้งแอมป์มิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ โอห์มมิเตอร์ และมิเตอร์วัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆ ไว้ในเครื่องเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.41 มิเตอร์วัดค่าทางไฟฟ้า หรือ Electrical Meter คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดและแสดงค่าปริมาณทางไฟฟ้า เช่น กระแส แรงดัน ความต้าน กำลังไฟฟ้า เป็นต้น มิเตอร์วัดค่าทางไฟฟ้าจึงเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในงานด้านไฟฟ้า งานติดตั้งระบบ และงานด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง



ภาพประกอบ 2.41 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM) [59]

2.17.1 ประเภทของมัลติมิเตอร์ สามารถแบ่งชนิดมัลติมิเตอร์ตามการใช้งานได้ 2 แบบ คือ

1. มัลติมิเตอร์แบบอนาล็อก (Analog Multimeter) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.42
2. มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล (Digital Multimeter) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.43



ภาพประกอบ 2.42 มัลติมิเตอร์แบบอนาล็อก (Analog Multimeter) [60]



ภาพประกอบ 2.43 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล (Digital Multimeter) [61]

2.17.2 หลักการทำงานของมัลติมิเตอร์

มัลติมิเตอร์มีหลักการทำงาน คือ เมื่อป้อนกระแสไฟเข้าไปจะทำให้ขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการเกิดอำนาจแม่เหล็กนี้จะส่งผลไปยังเข็มที่ยึดติดอยู่เกิดการเคลื่อนที่ ในปัจจุบันมีการพัฒนาจนกลายเป็นมัลติมิเตอร์ในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นมัลติมิเตอร์แบบเข็ม (Analog Multimeter) และมัลติมิเตอร์แบบตัวเลข (Digital Multimeter) เป็นต้น

ความแตกต่างของการทำงานของมัลติมิเตอร์แบบเข็มและดิจิตอลมัลติมิเตอร์นั้นคือ เมื่อมีปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการวัดไหลเข้าสู่วงจร ถ้าเป็นมัลติมิเตอร์แบบเข็มจะเปลี่ยนปริมาณไฟฟ้าที่วัดเป็นปริมาณทางกลและขับไปยังเข็มที่ยึดติดไว้ทำให้เข็มนั้นเคลื่อนที่ไปยังค่าที่วัดได้ ส่วนดิจิตอลมัลติมิเตอร์จะเปลี่ยนปริมาณทางไฟฟ้านั้นส่งผ่านไปยังวงจรสัญญาณดิจิตอลและส่งต่อไปยังหน้าจอเพื่อแสดงผลเป็นตัวเลข

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์

- ผ้าคอตตอนดิบ (Cotton)
- สีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive Dye)
- สีย้อมชนิดไดเรกต์ (Direct Dye)
- สีย้อมชนิดเบสิก (Basic Dye)
- โพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS)
- เทปอะลูมิเนียม (Aluminum tape)
- แผ่นอะคริลิก (Acrylic sheet)
- สปริง (Spring)
- สายไฟ
- อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.1.2 สารเคมี

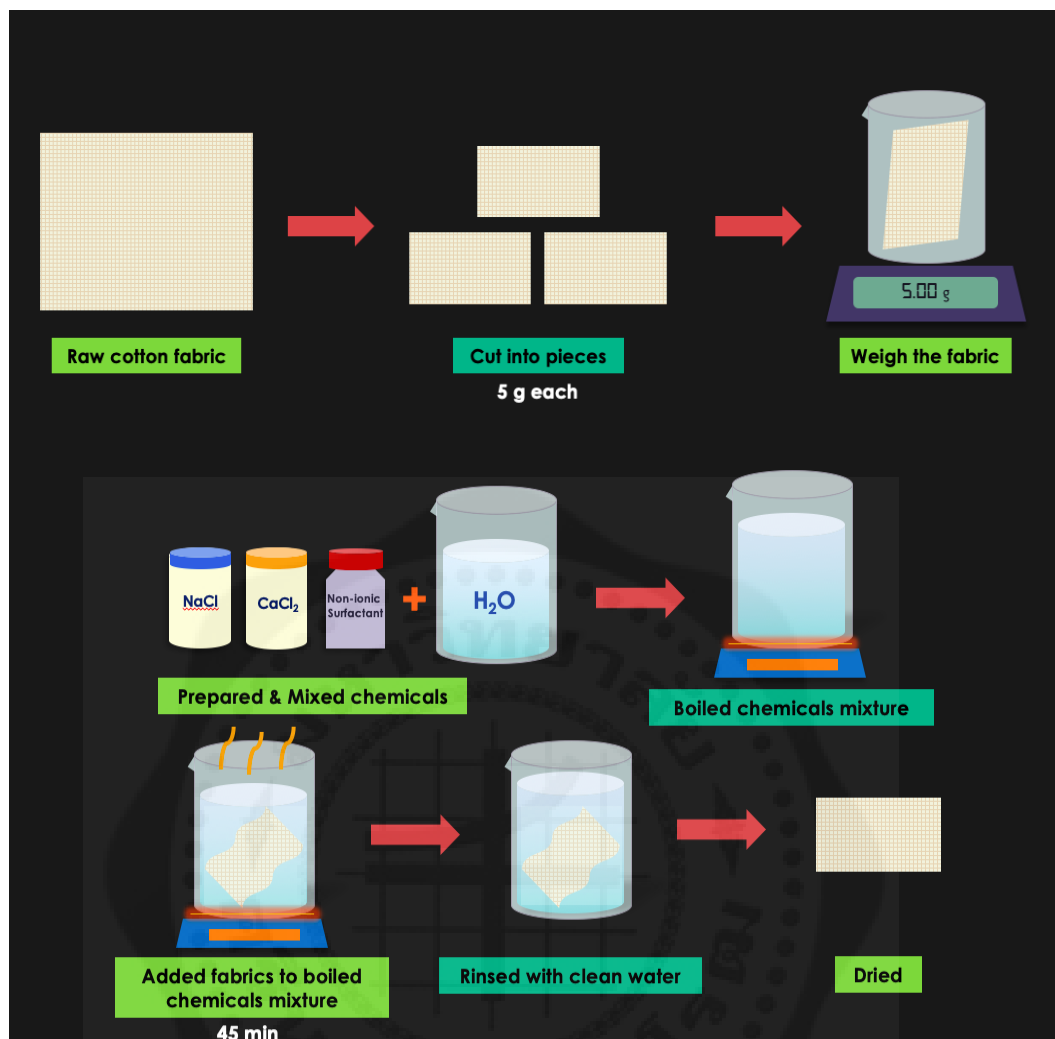
- โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)
- แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)
- สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
- โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate)
- โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate)
- โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate)
- โซเดียมอะซิเตท (Sodium Acetate)
- สารช่วยเปียก (Wetting agent)
- ผงซักฟอกแบบไม่มีไอออน (Nonionic detergents)

3.2 การเตรียมผ้าคอตตอน (Preparation of cotton fabrics)

3.2.1 การลอกแป้งผ้าคอตตอนดิบ (Desizing of cotton fabrics)

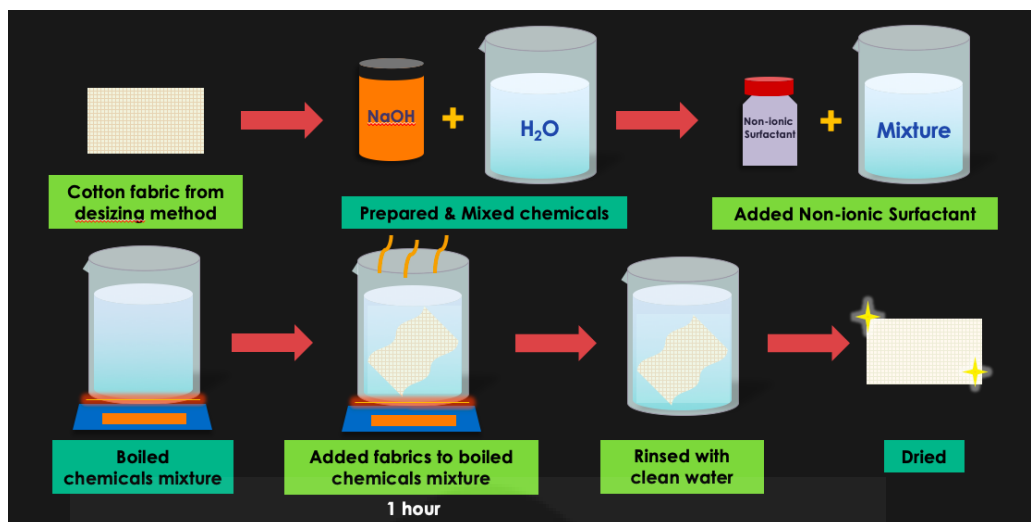
ตัดผ้าคอตตอนดิบประมาณ 5 กรัม แล้วชั่งน้ำหนัก และจดน้ำหนักผ้าก่อนการลอกแป้ง จากนั้นตรวจสอบสิ่งสกปรกบนผ้า และตรวจสอบการดูดซึมของน้ำบนผ้าโดยหยดน้ำกลั่น 1 หยดลงบนผ้า จับเวลาตั้งแต่ผ้าโดนน้ำจนน้ำซึมเข้าผ้าหมด และหยุดจับเวลาเมื่อเกิน 60 วินาที ทำการเตรียมสารเคมี สำหรับการลอกแป้งโดยผสม โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) 10 กรัมต่อลิตร, แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) 0.5 กรัมต่อลิตร และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) ในน้ำที่ อัตราส่วนผ้าต่อน้ำ หรือ L : R คือ 1 : 20 และค่า pH เท่ากับ 6.5 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นนำผ้าคอตตอนล้างในน้ำเดือดเพื่อขจัดแป้งที่ย่อยสลายเป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำเย็นจนสะอาด จากนั้นตากให้แห้ง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนการลอกแป้งผ้าคอตตอนดิบ

3.2.2 การกำจัดสิ่งสกปรกบนผ้าคอตตอน (Scouring of cotton fabrics)

นำผ้าที่ผ่านการลอกแป้งแล้ว มาซังน้ำหนักและจดบันทึกน้ำหนักผ้าก่อน และตรวจสอบการดูดซึมของน้ำบนผ้าตามข้อ 3.2.1 จากนั้นทำการเตรียมสารเคมีสำหรับกำจัดสิ่งสกปรกโดยผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) 4 % และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) 0.2 % ในน้ำที่อัตราส่วน L : R คือ 1 : 20 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างผ้าด้วยน้ำสะอาดแล้วตากให้แห้ง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.2



ภาพประกอบ 3.2 ขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกบนผ้าคอตตอน

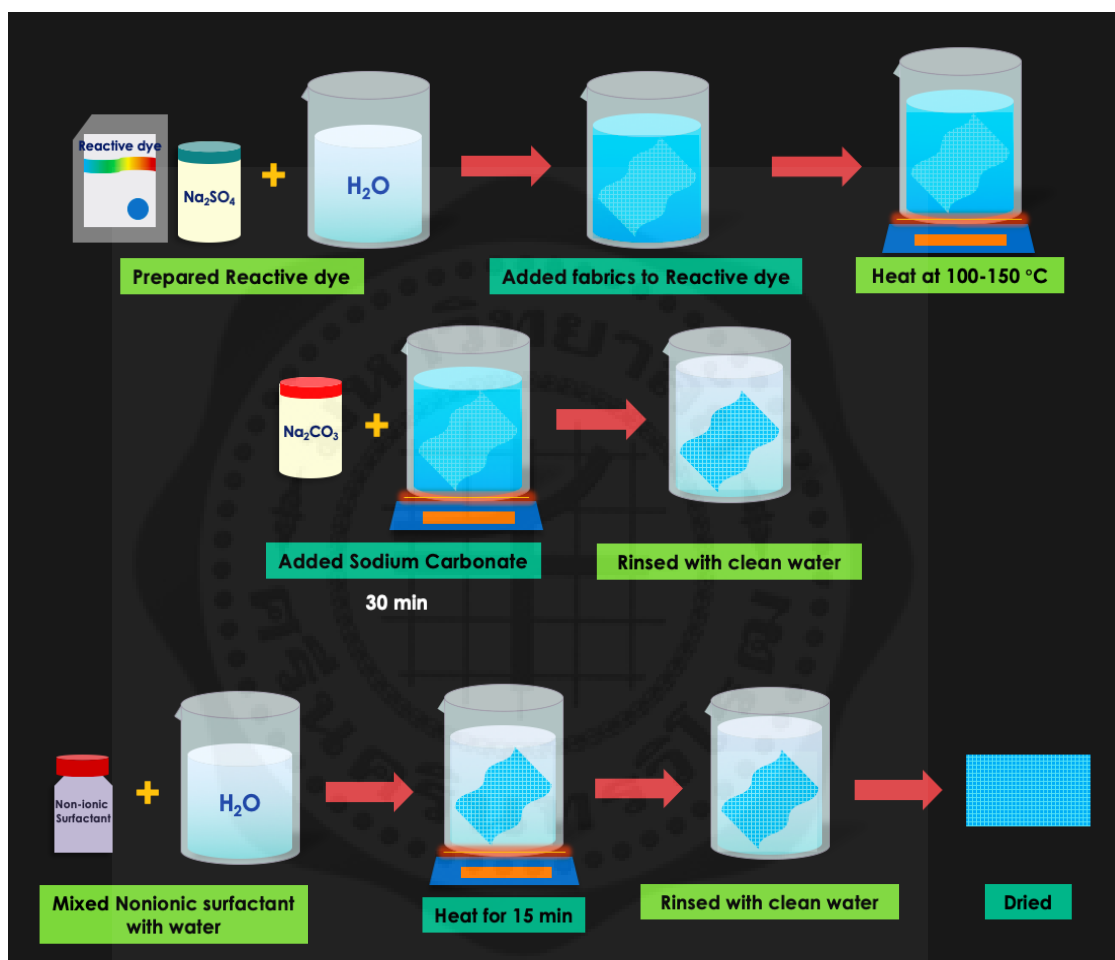
3.3 การเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอน (Preparation of dyes and Dyeing cotton fabrics)

3.3.1 การเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyeing process)

ตาราง 1 ตารางการเตรียมสีย้อมรีแอคทีฟ

กระบอกที่	สีย้อมรีแอคทีฟ	ความเข้มข้น (%owf)	Na_2SO_4 (g/L)	Na_2CO_3 (g/L)	สารลดแรงตึงผิว ชนิดประจุลบ	Liquor ratio
1	เขียว	2	20	10	5	1 : 20
2	แดง	2	20	10	5	1 : 20
3	ส้ม	2	20	10	5	1 : 20
4	เหลือง	2	20	10	5	1 : 20
5	น้ำตาล	2	20	10	5	1 : 20
6	น้ำเงิน	2	20	10	5	1 : 20

นำผ้าที่เตรียมจาก 3.2 มาใส่ลงในกระบอกสีย้อมทั้ง 6 กระบอกที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วล้างผ้าด้วยน้ำเย็นเพื่อล้างน้ำสีย้อมออก จากนั้นนำผ้าไปต้มล้างในน้ำสบู่ เพื่อกำจัดเอาสีที่ติดซึมเข้าไปในเส้นใยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยออก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นล้างผ้าด้วยน้ำสะอาดแล้วตากให้แห้ง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.3



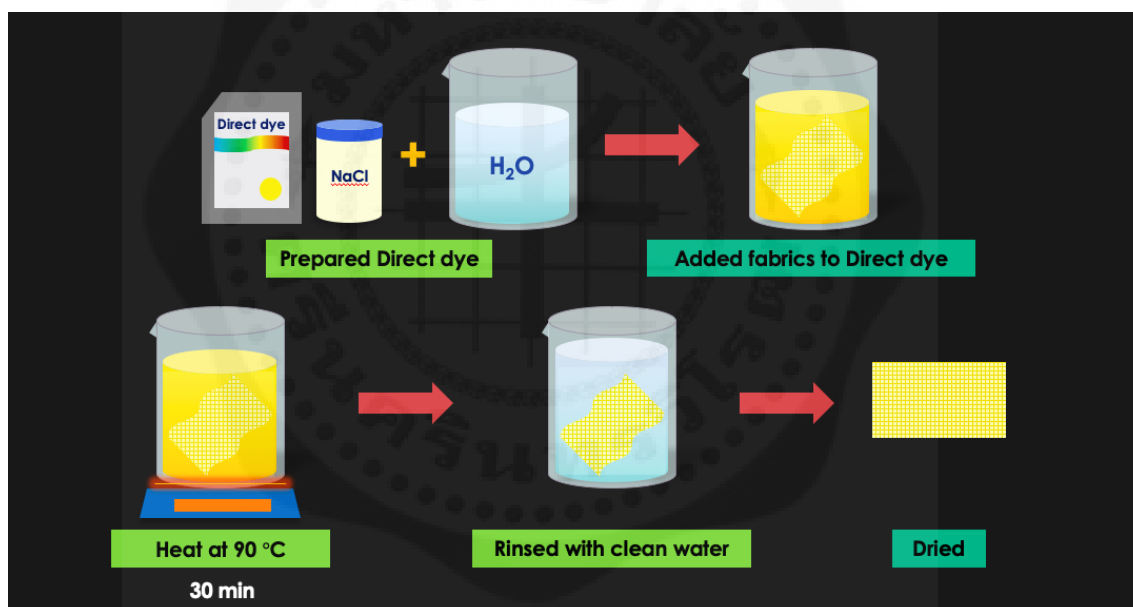
ภาพประกอบ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีรีแอคทีฟ

3.3.2 การเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีไคเรกท์ (Direct dyeing process)

ตาราง 2 ตารางการเตรียมสีไคเรกท์

กระบอกที่	สีไคเรกท์	ความเข้มข้น (%owf)	NaCl (%owf)	Liquor ratio
1	แดง	2	30	1 : 20
2	เหลือง	2	30	1 : 20
3	น้ำเงิน	2	30	1 : 20

นำผ้าที่เตรียมจาก 3.2 มาใส่ลงในกระบอกสีย้อมทั้ง 3 กระบอกที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนถึง 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วล้างผ้าด้วยน้ำเย็น จากนั้นตากให้แห้ง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.4



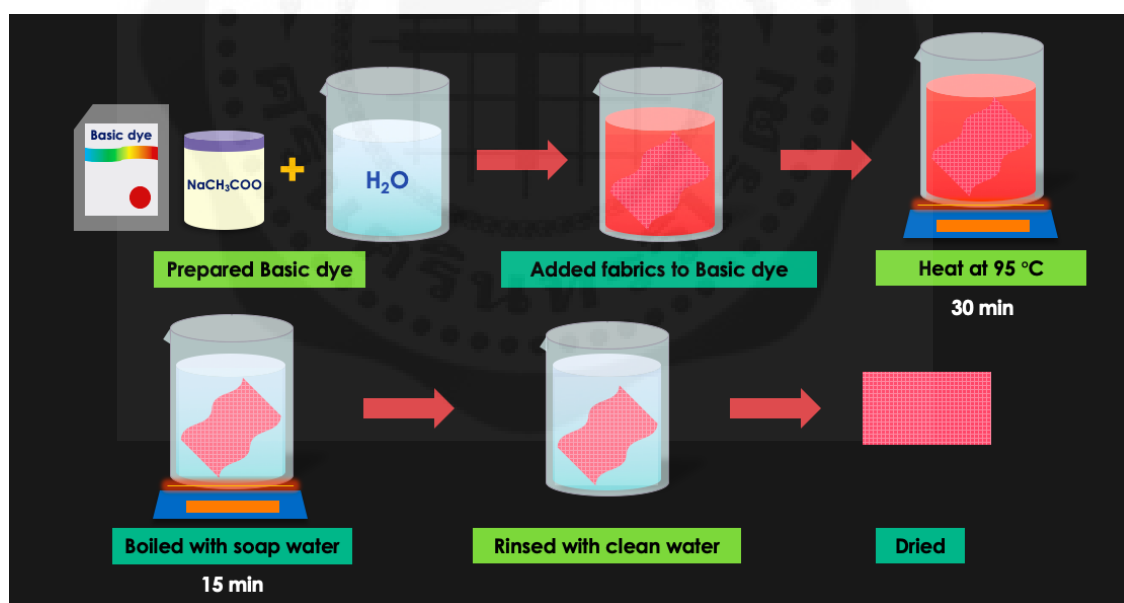
ภาพประกอบ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีไคเรกท์

3.3.3 การเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีเบสิก (Basic dyeing process)

ตาราง 3 ตารางการเตรียมสีเบสิก

กระบอกที่	สีเบสิก	ความเข้มข้น (%owf)	NaCH ₃ COO (g/L)	Wetting agent (g/L)	Liquor ratio
1	แดง	2	5	5	1 : 20
2	เหลือง	2	5	5	1 : 20
3	น้ำเงิน	2	5	5	1 : 20

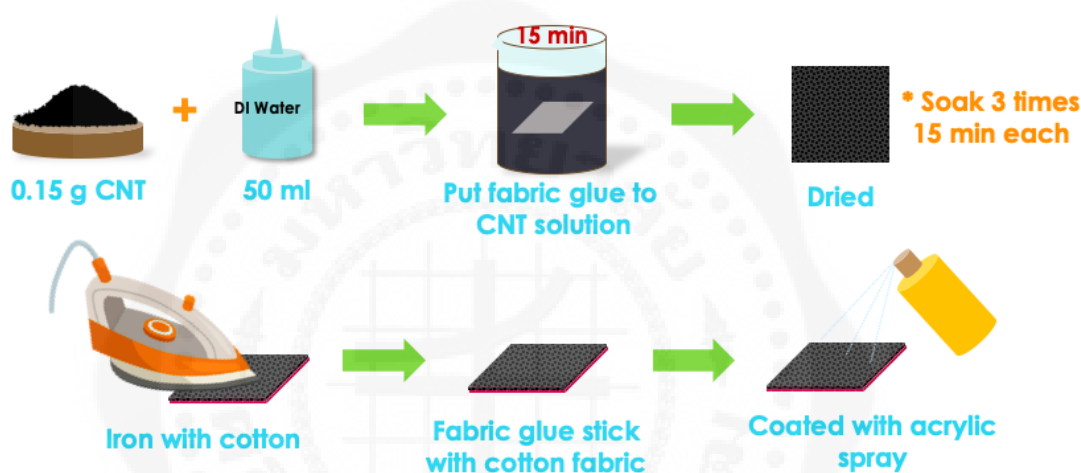
นำผ้าที่เตรียมจาก 3.2 มาใส่ลงในกระบอกสีย้อมทั้ง 3 กระบอกที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนถึง 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นล้างด้วยผงซักฟอกแบบไม่มีไอออน (Nonionic detergents) 2 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วล้างผ้าด้วยน้ำเย็น จากนั้นตากให้แห้ง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.5



ภาพประกอบ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อม และการย้อมผ้าคอตตอนด้วยสีเบสิก

3.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการทำเป็นคอมโพสิตระหว่างผ้ากาวและ CNT

จากปัญหาการใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเทปอะลูมิเนียม (Aluminum tape) ในเรื่องของความคงทนต่ำ ไม่สามารถติดกับผ้าคอตตอนได้ และหลุดร่อนได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาการทำขั้วไฟฟ้าโดยการทำเป็นคอมโพสิตระหว่างผ้ากาวและ CNT ซึ่งจะมีกระบวนการ ดังนี้ นำผง CNT 0.15 กรัม ผสมกับน้ำ DI 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำผ้ากาวแช่ในสารละลาย CNT เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงนำไปตากให้แห้ง โดยจะทำกระบวนการแช่อีกจำนวน 2 รอบ จากนั้นนำผ้ากาวที่ผ่านการชุบด้วย CNT รีดติดกับผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสี แล้วจึงพ่นด้วยอะคริลิก (Acrylic) เพื่อเคลือบ ดังภาพประกอบที่ 3.6



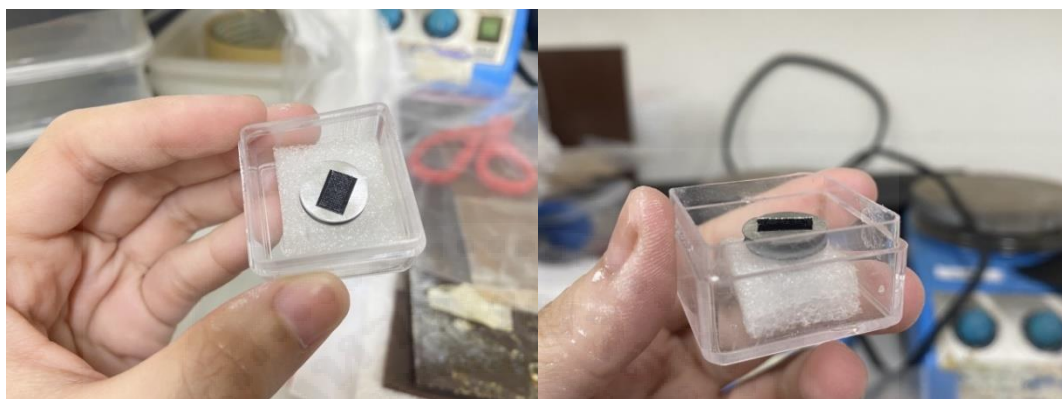
ภาพประกอบ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการทำเป็นคอมโพสิตระหว่างผ้ากาวและ CNT

3.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การเตรียมตัวอย่างก่อนศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติที่ดี และสามารถศึกษา บันทึกภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเตรียมตัวอย่างทางด้านวัสดุศาสตร์สามารถเตรียมได้ดังต่อไปนี้คือ

1. เตรียมแท่นวางชิ้นงาน (Stub) สำหรับใส่ชิ้นงานตัวอย่าง และตรวจสอบดูว่ามีสนิมหรือไม่ ถ้ามีสนิมให้ทำการขัดด้วยกระดาษทราย
2. นำชิ้นงานตัวอย่างที่จะทำการทดสอบมาเตรียมสำหรับตัด ในงานวิจัยนี้มีสองชิ้นงาน คือ ผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT และถูกรีดติดกับผ้าคอตตอน และผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT

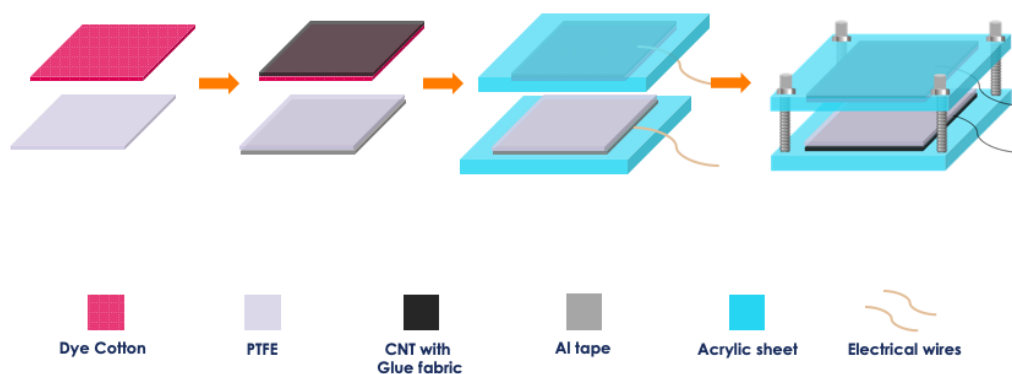
3. ทำการตัดชิ้นงานให้สามารถติดลงบน Stub ได้
4. ทำการตัดเทปคาร์บอน (Carbon Tape) จากนั้นติดลงบน Stub
5. นำชิ้นงานติดลงบนเทปคาร์บอนที่อยู่บน Stub (ควรระวังไม่ให้สิ่งสกปรกแปลกปลอมเข้าไป และห้ามใช้มือจับชิ้นงานเด็ดขาด)
6. เมื่อเตรียมชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะได้ชิ้นงานดังภาพประกอบที่ 3.7



ภาพประกอบ 3.7 ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมเพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.6 การประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (TENG)

การประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้ จะประกอบไปด้วยชั้นสัมผัสสองชั้น คือ ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสี (สีรีแอกทีฟ, สีไดเรกต์ และสีเบสิค) และพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) หรือ เทฟลอน (Teflon; ชื่อทางการค้าของดुปองท์) โดยชั้นสัมผัสที่เป็นผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีจะถูกติดด้วยขั้วไฟฟ้าที่เป็นคอมโพสิตระหว่างผ้าขาวและCNT ส่วนชั้นของเทฟลอนจะถูกติดด้วยขั้วไฟฟ้าที่เป็นเทปอะลูมิเนียม (Aluminum tape) แล้วทำการปิดด้วยแผ่นอะคริลิก (Acrylic sheet) ทั้งบนและล่างเพื่อป้องกันชั้นสัมผัสโดนจะทำการยึดแผ่นอะคริลิกด้วยสปริง



ภาพประกอบ 3.8 โครงสร้าง และส่วนประกอบของ TENG

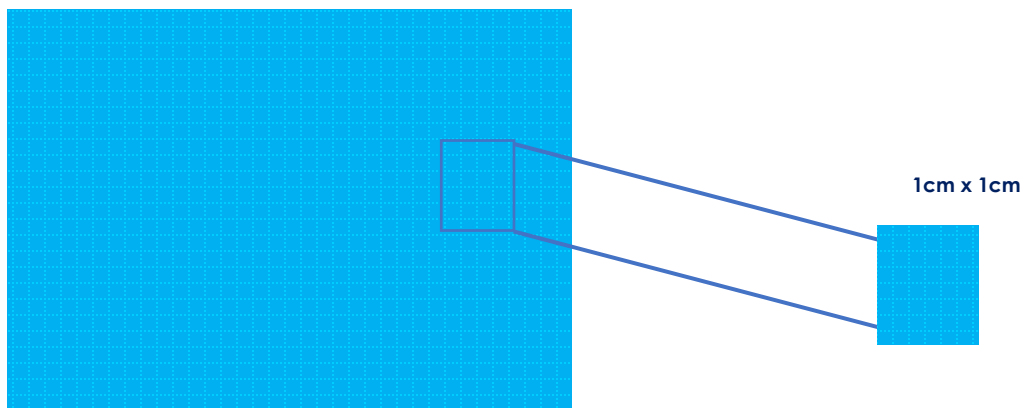
3.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และตรวจสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า

3.7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ในการศึกษาพื้นฐานวิทยา โครงสร้าง และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ SEM เพื่อดูลักษณะทางพื้นฐานวิทยาของผ้าคอตตอน ก่อนและหลังการย้อมสี

3.7.2 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ใช้วิเคราะห์จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR โดยตัดผ้าคอตตอนทั้งก่อนและหลังการย้อมสี เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.9 เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างทางเคมีของผ้าคอตตอน ก่อนและหลังการย้อมสี



ภาพประกอบ 3.9 การเตรียมชิ้นงานผ้าคอตตอนเพื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิค FTIR

3.7.3 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือที่แสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟ ใช้สำหรับวัดคลื่นไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความถี่ของสัญญาณ เฟสของสัญญาณ และคาบเวลา โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อวัดค่าการส่งออกจากไฟฟ้าของ TENG ประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage), ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้า (Output power)

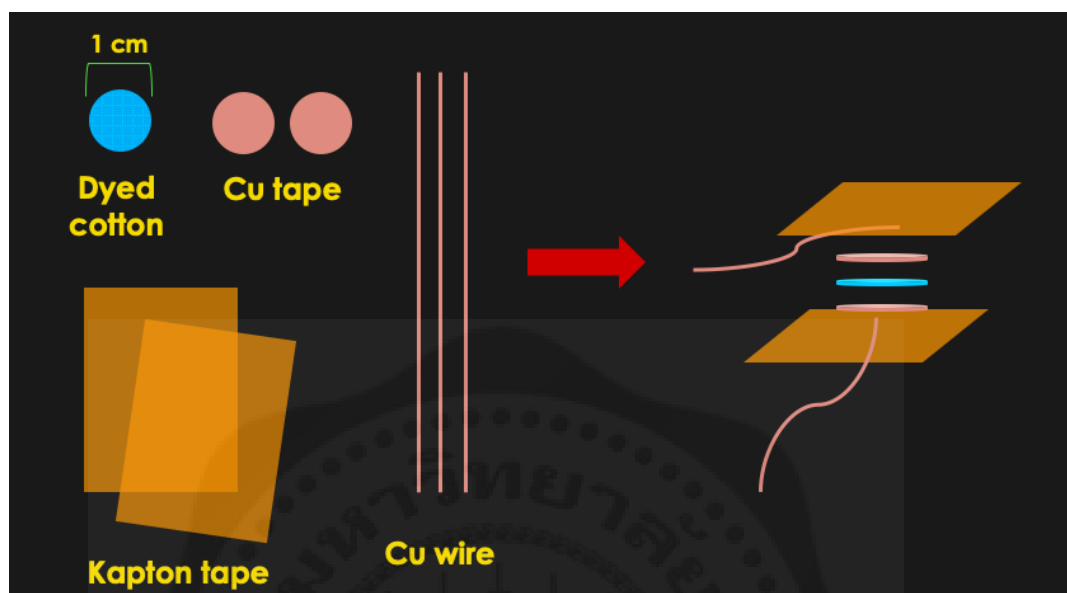
3.7.4 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM)

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เป็นเครื่องมือวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าพื้นฐานในงานด้านไฟฟ้า และด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งใช้วัดและแสดงค่าปริมาณทางไฟฟ้า เช่น กระแส แรงดัน ความต้าน กำลังไฟฟ้า เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ เพื่อวัดค่าการส่งออกจากไฟฟ้า คือ ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของ Cotton-based TENG

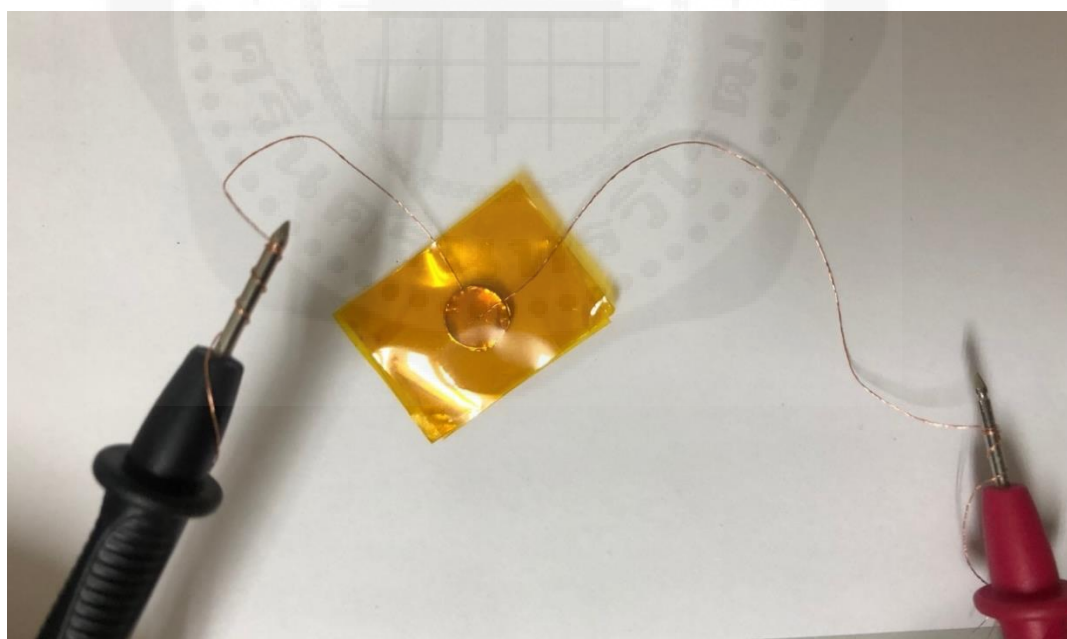
3.7.5 เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter)

เครื่องวัดแอลซีอาร์ เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิด เพื่อวัดค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย ค่าการเหนี่ยวนำ, ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้านทาน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องวัดแอลซีอาร์ ในการวัดและทดสอบค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบ คือ ตัดเทปทองแดง และผ้าคอตตอนทั้งก่อนและหลังการย้อมสีที่เตรียมไว้ ให้มีรูปร่างเป็นวงกลม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 1 เซนติเมตร ทำการเตรียมลวดทองแดง 2 ชุด โดยแต่ละชุดจะประกอบไปด้วยลวดทองแดงขนาดประมาณ 10 เซนติเมตร จำนวน 3

เส้น มาพันเกลียวเข้าด้วยกัน ตัดเทปแคปตอน (Kapton tape) ให้อยู่ในขนาดที่เหมาะสม จากนั้น ประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกันตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.9 และ 3.10



ภาพประกอบ 3.10 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน สำหรับนำไปทดสอบและวัดค่าไดอิเล็กทริก



ภาพประกอบ 3.11 ชิ้นงานสำหรับนำไปทดสอบและวัดค่าไดอิเล็กทริก

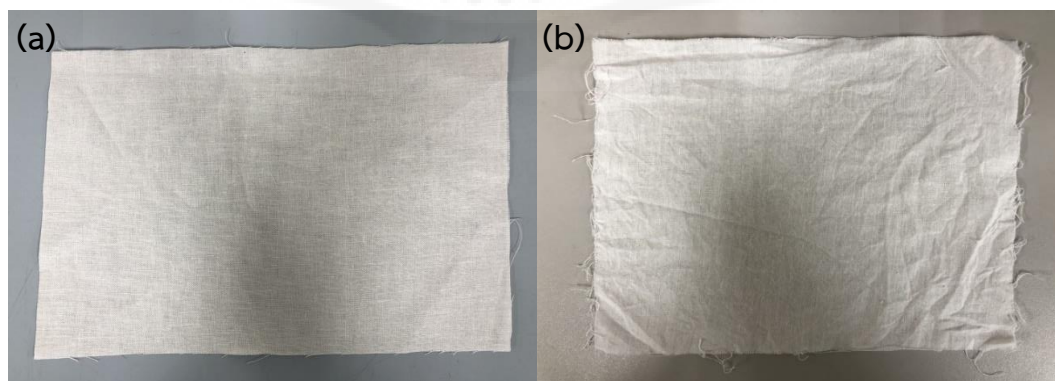
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการย้อมสี

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการลอกแป้งและการกำจัดสิ่งสกปรก

จากการสังเกตผ้าคอตตอนดิบก่อนการลอกแป้ง จะเห็นว่า ผ้าคอตตอนมีความหมอง ลักษณะเนื้อผ้ามีความแข็งและความหยาบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.1 (a) ภายหลังจากการนำผ้าคอตตอนดิบไปทำการลอกแป้ง โดยการใช้สารเคมีที่ผ่านการเตรียมจากการผสม โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) 10 กรัมต่อลิตร, แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) 0.5 กรัมต่อลิตร และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) ในน้ำที่อัตราส่วนผ้าต่อน้ำ หรือ L : R คือ 1 : 20 และค่า pH เท่ากับ 6.5 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นนำผ้าคอตตอนล้างในน้ำเดือดเพื่อขจัดแป้งที่ย่อยสลายเป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำจนสะอาด จากนั้นตากให้แห้ง จะได้ผ้าคอตตอนที่ผ่านการลอกแป้ง และภายหลังจากการนำผ้าคอตตอนไปทำการกำจัดสิ่งสกปรก โดยการใช้สารเคมีที่ผ่านการเตรียมจากการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) 4 % และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) 0.2 % ในน้ำที่อัตราส่วน L : R คือ 1 : 20 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างผ้าด้วยน้ำสะอาดแล้วตากให้แห้ง ผ้าคอตตอนที่ได้จะมีความสว่างมากขึ้น ลักษณะเนื้อผ้ามีความบางและอ่อนตัวลง อีกทั้งมีความสะอาดมากยิ่งขึ้น สิ่งสกปรกที่มีอยู่บนผ้าลดลง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.1 (b)

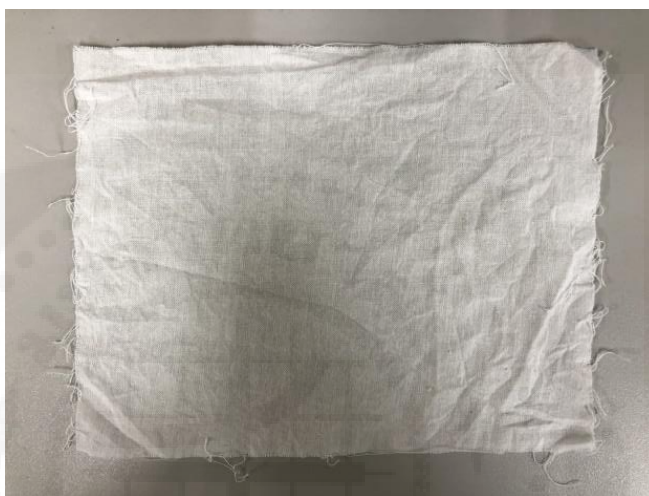


ภาพประกอบที่ 4.1 (a) ผ้าคอตตอนดิบก่อนการลอกแป้ง และ(b) ผ้าคอตตอนหลังการกำจัดสิ่งสกปรก

4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนก่อน และหลังการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ สีไคเรกท์ และสีเบสิก

4.1.2.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนก่อนการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ สีไคเรกท์ และสีเบสิก

จากการนำผ้าคอตตอนที่ผ่านการลอกแป้งและการกำจัดสิ่งสกปรก จะได้ผ้าคอตตอนที่จะใช้สำหรับการย้อมสีรีแอคทีฟ สีไคเรกท์ และสีเบสิก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.2



ภาพประกอบที่ 4.2 ผ้าคอตตอนก่อนการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ สีไคเรกท์ และสีเบสิก

4.1.2.2 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ

จากการนำผ้าคอตตอนที่ผ่านการลอกแป้งและการกำจัดสิ่งสกปรกแล้ว มาทำการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ โดยใส่ลงในกระบอกสีย้อมทั้ง 6 กระบอก ซึ่งได้แก่ สีเขียว สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีนํ้าตาล และสีฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วล้างผ้าด้วยน้ำสะอาดเพื่อล้างน้ำสีย้อมออก จากนั้นนำผ้าไปต้มล้างในน้ำสบู่ เพื่อกำจัดเอาสีที่ติดซึมเข้าไปในเส้นใยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยออก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และล้างผ้าด้วยน้ำสะอาดแล้วตากให้แห้ง จะได้ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟทั้ง 6 สี ที่ติดบนผ้าอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.3



ภาพประกอบที่ 4.3 ผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ

4.1.2.3 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีไคเรกท์

จากการนำผ้าคอตตอนที่ผ่านการลอกแป้งและการกำจัดสิ่งสกปรกแล้ว มาทำการย้อมด้วยสีไคเรกท์ โดยใส่ลงในกระบอกสีย้อมทั้ง 5 กระบอก ซึ่งได้แก่ สีเขียว สีแดง สีส้ม สีเหลือง และสีฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนถึง 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วล้างผ้าด้วยน้ำเย็น จากนั้นตากให้แห้ง จะได้ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีไคเรกท์ทั้ง 5 สี ที่ติดบนผ้าอย่างสม่ำเสมอ และมีความสดใส ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.4



ภาพประกอบที่ 4.4 ผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีไคเรกท์

4.1.2.4 ลักษณะทางกายภาพของผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีเบสิค

จากการนำผ้าคอตตอนที่ผ่านการลอกแป้งและการกำจัดสิ่งสกปรกแล้ว มาทำการย้อมด้วยสีเบสิค โดยใส่ลงในกระบอกสีย้อม 1 กระบอก ได้แก่ สีแดง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนถึง 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นล้างด้วยผงซักฟอกแบบไม่มีไอออน (Nonionic detergents) 2 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วล้างผ้าด้วยน้ำเย็น จากนั้นตากให้แห้ง จะได้ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีเบสิคที่ติดสีแดงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.5



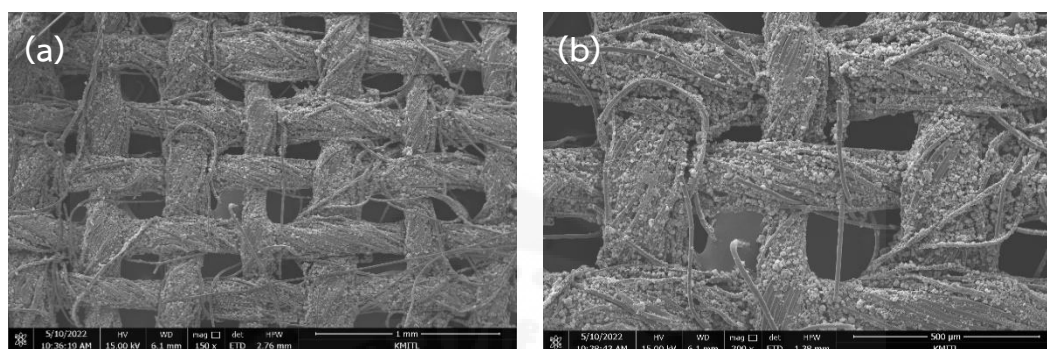
ภาพประกอบที่ 4.5 ผ้าคอตตอนหลังการย้อมด้วยสีเบสิค

4.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer; SEM-EDS) ของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT และผ้าคอตตอน

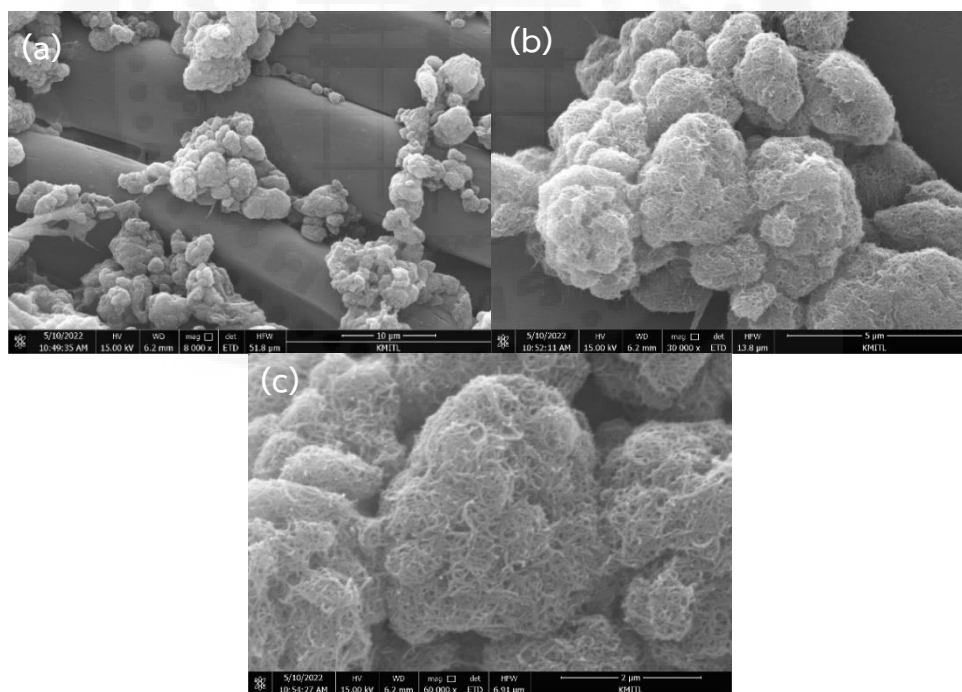
4.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT

จากการนำผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT ไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แบบพื้นผิว (Surface) พบว่า มีลักษณะเป็นรูพรุนที่เกิดจากการถักทอที่กำลังขยาย 150 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.6 (a) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 300 เท่า จะแสดงให้เห็นอนุภาคขนาดเล็กของ CNT ที่กระจายตัวอยู่บริเวณของผ้ากาว ดังภาพประกอบที่ 4.6 (b) และเมื่อเพิ่มกำลังขยายไปที่ 8,000 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.7 (a) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.7 (b) และที่กำลังขยาย 60,000 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.7 (c) จะแสดงให้เห็น CNT ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็กเกาะตัวรวมกันอยู่บนเส้นใยของผ้ากาวได้อย่างชัดเจน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Hui และ

คณะ [21] ได้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของผ้าคอตตอนหลังทำการย้อมด้วย CNT พบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้าคอตตอน ปรากฏให้เห็นเป็นเส้นใยรวมตัวพันกันเป็นเกลียวอยู่ และแสดงให้เห็นรูพรุนระหว่างชั้นของเส้นใยที่พันทับกันอยู่ และเมื่อพิจารณาที่ความละเอียดสูงขึ้น พบว่ามี CNT ไปเคลือบอยู่บริเวณเส้นใยของผ้าคอตตอน เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับการนำผ้าขาวที่ทำการชุบด้วย CNT ของผู้วิจัยไปวิเคราะห์ด้วย SEM



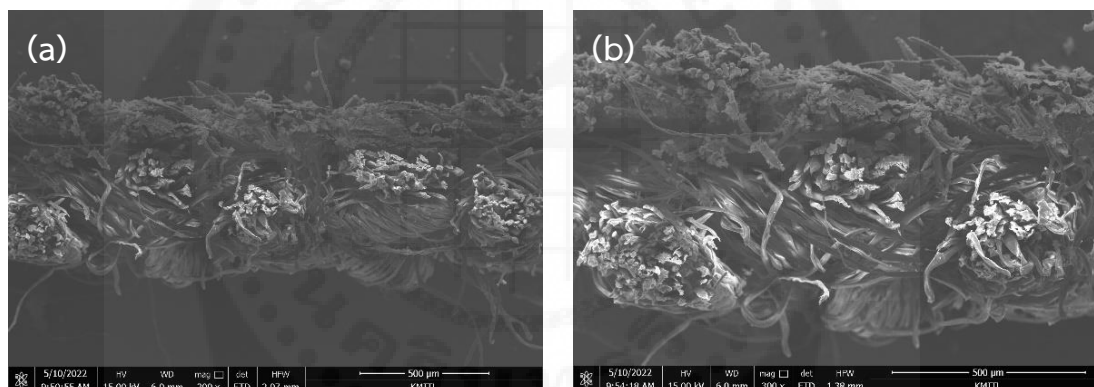
ภาพประกอบที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT (a) ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 300 เท่า



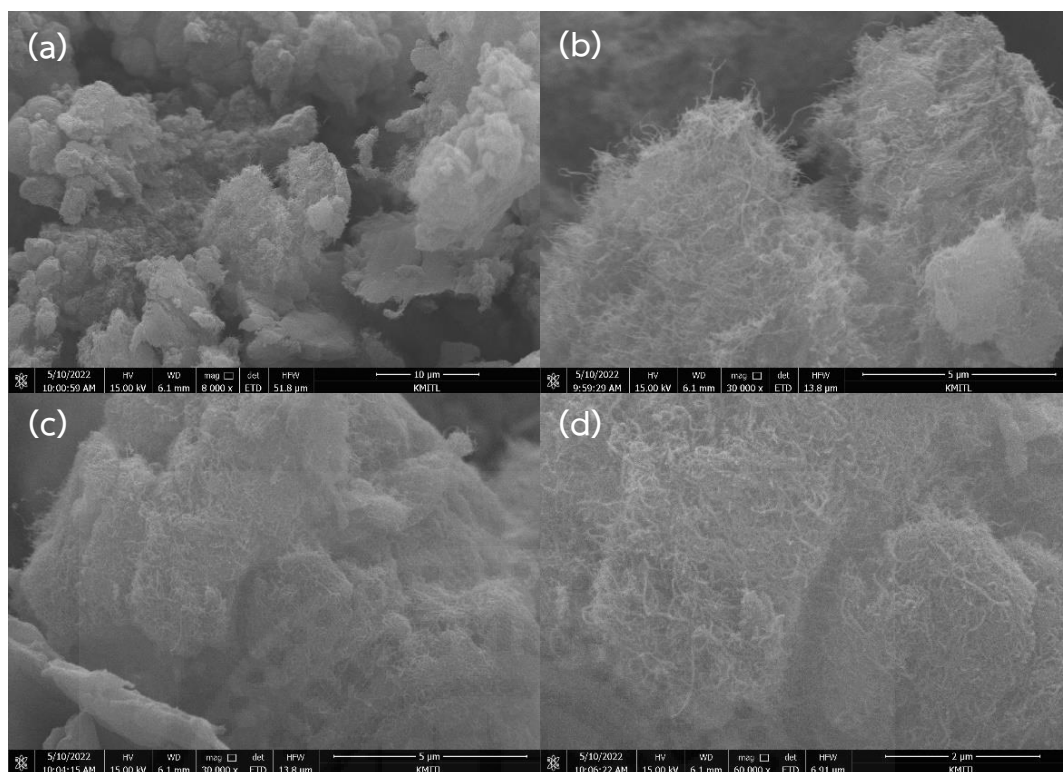
ภาพประกอบที่ 4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ CNT ที่เกาะตัวอยู่บนผ้าขาว (a) ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า, (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า และ (d) ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า

4.2.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT และถูกรีดติดกับผ้าคอตตอน

จากการนำผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT และถูกรีดติดกับผ้าคอตตอน ซึ่งมีความหนาโดยรวม $517.58 \pm 30.21 \mu\text{m}$ ไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แบบภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.8 (a) และที่กำลังขยาย 300 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.8 (b) พบว่า จะแสดงให้เห็นเป็นชั้นสองชั้น โดยที่บริเวณด้านล่าง คือ ชั้นของผ้าคอตตอน ที่มีความหนา $305.94 \pm 28.17 \mu\text{m}$ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยเรียงตัวซับซ้อนกันอย่างหนาแน่น และบริเวณด้านบน คือ ชั้นของข้าวไฟฟ้า หรือ ผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT ที่มีความหนา $166.07 \pm 13.42 \mu\text{m}$ โดยเมื่อเพิ่มกำลังขยายไปที่ 8,000 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.9 (a), ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.9 (b) และ 4.9 (c) และที่กำลังขยาย 60,000 เท่า ดังภาพประกอบที่ 4.9 (d) พบว่า CNT มีลักษณะเป็นเส้นกระจายตัวอยู่บนผ้ากาว ซึ่งจากการใช้โปรแกรม ImageJ ในการวัดขนาดทำให้สามารถประมาณขนาดของ CNT ได้ ซึ่งอยู่ในช่วง 40-60 nm



ภาพประกอบที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT และผ้าคอตตอน (a) ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 300 เท่า

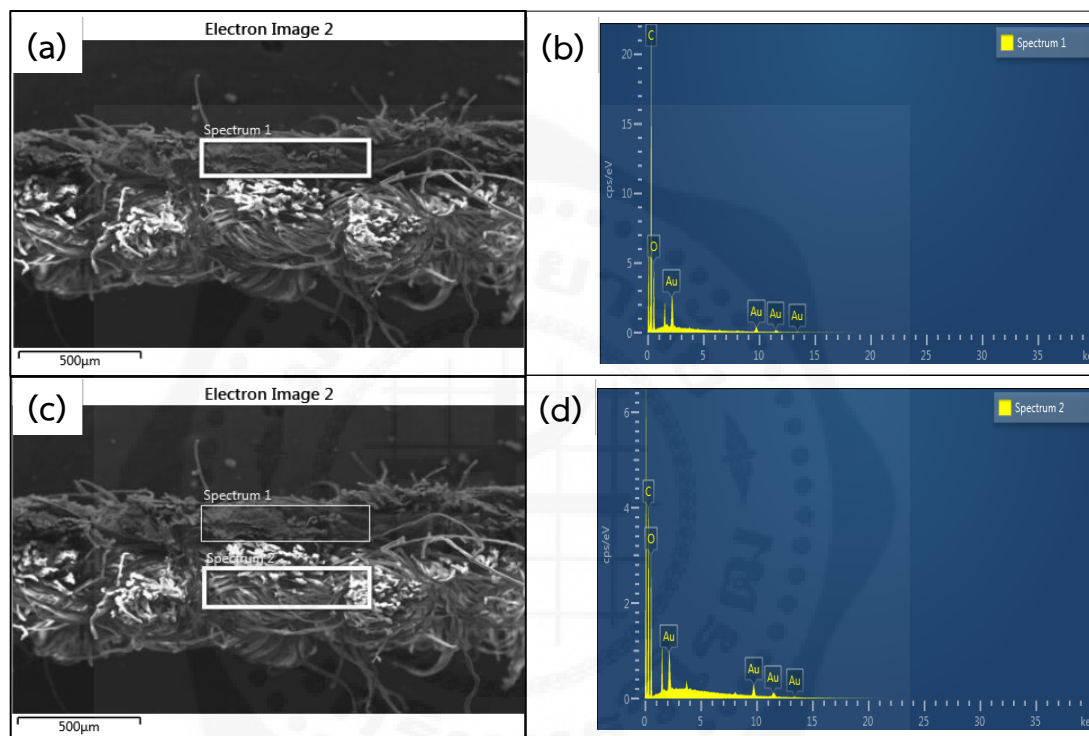


ภาพประกอบที่ 4.9 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ CNT ที่กระจายตัวอยู่บนผ้าขาว (a) ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า, (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า และ (d) ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า

4.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT และถูกรีดติดกับผ้าคอตตอน

จากการนำผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT และถูกรีดติดกับผ้าคอตตอนไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (EDS) แสดงให้เห็น ชั้นของผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT ดังภาพประกอบที่ 4.10 (a) บริเวณ Spectrum 1 พบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุคาร์บอน (Carbon) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ CNT ที่ปนอยู่กับธาตุออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผ้าคอตตอน ดังภาพประกอบที่ 4.10 (b) เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ของผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT แสดงดังตาราง 5 ผลที่ได้พบว่า มีปริมาณธาตุคาร์บอนอยู่ 64.82 % และปริมาณธาตุออกซิเจนอยู่ 29.06 % ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงปริมาณของธาตุคาร์บอนที่มากกว่าออกซิเจน 2.2 เท่า เนื่องจาก CNT เป็นธาตุที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเพียงชนิดเดียว ทำให้มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีอยู่ในผ้าคอตตอน จึงสามารถสรุปได้ว่า เป็นชั้นของผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT ในทางตรงกันข้าม ชั้นของผ้าคอตตอน ดังภาพประกอบที่ 4.10 (c) บริเวณ Spectrum 2 พบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุคาร์บอน (Carbon) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ CNT ที่ปนอยู่กับธาตุออกซิเจน (Oxygen) เช่นเดียวกับชั้นของผ้าขาวที่ชุบด้วย

CNT ดังภาพประกอบที่ 4.10 (d) เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ของผ้าคอตตอน แสดงดังตาราง 6 ผลที่ได้พบว่า มีปริมาณธาตุคาร์บอนอยู่ 48.54 % และปริมาณธาตุออกซิเจนอยู่ 44.01 % ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงปริมาณของธาตุคาร์บอนที่มากกว่าออกซิเจนเพียง 1 เท่า เนื่องมาจากชั้นของผ้าคอตตอนไม่มี CNT เป็นองค์ประกอบอยู่ จึงทำให้ปริมาณของธาตุคาร์บอนเทียบกับออกซิเจนน้อยกว่าชั้นของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT จึงสามารถยืนยันได้ว่า ในบริเวณชั้นด้านบนที่เป็นชั้นของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT เนื่องจากมีปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ปรากฏจำนวนมากกว่าชั้นของผ้าคอตตอน



ภาพประกอบที่ 4.10 (a) ชั้นของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT (Spectrum 1 บริเวณที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS) (b) องค์ประกอบทางเคมีของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT (c) ชั้นของผ้าคอตตอน (Spectrum 2 บริเวณที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS) และ (d) องค์ประกอบทางเคมีของผ้าคอตตอน

ตาราง 4 วิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ชั้นของผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT

Element	Line	Apparent	k Ratio	% wt	% wt	Atomic	Standard	Factory
	Type	Concentration			Sigma	%	Label	Standard
C	K	58.68	0.58676	64.82	0.28	74.50	C Vit	Yes
	series							
O	K	17.70	0.05958	29.06	0.27	25.07	SiO ₂	Yes
	series							
Au	L	6.54	0.06542	6.12	0.20	0.43	Au	Yes
	series							
Total				100		100		

ตาราง 5 วิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ชั้นของผ้าคอตตอน

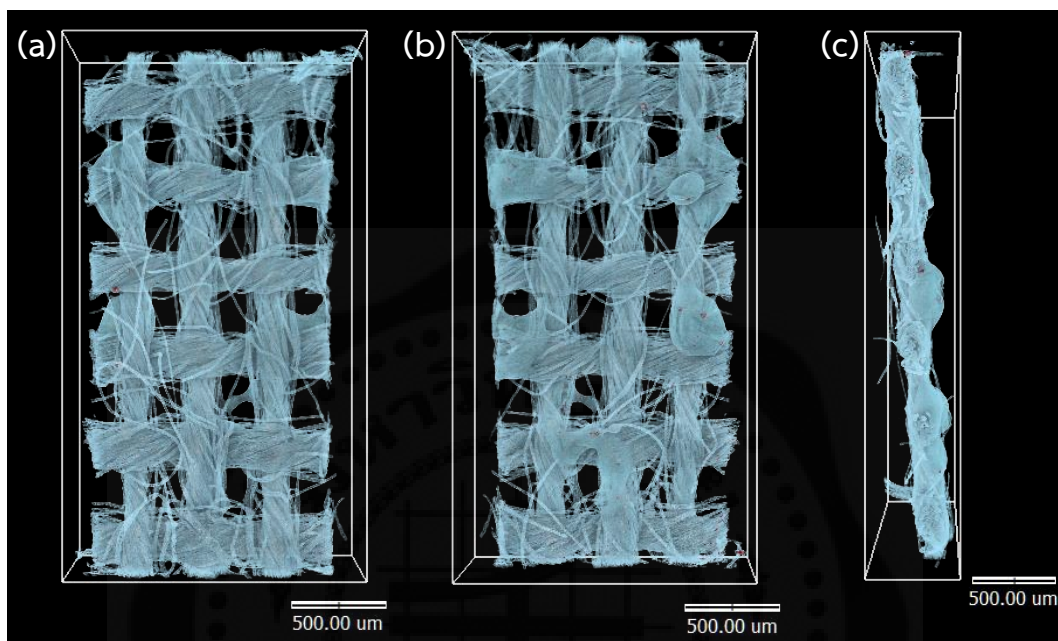
Element	Line	Apparent	k Ratio	% wt	% wt	Atomic	Standard	Factory
	Type	Concentration			Sigma	%	Label	Standard
C	K	29.39	0.29388	48.54	0.27	59.17	C Vit	Yes
	series							
O	K	28.37	0.09546	44.01	0.27	40.27	SiO ₂	Yes
	series							
Au	L	6.44	0.06443	7.45	0.22	0.55	Au	Yes
	series							
Total				100		100		

4.3 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของข้อไฟฟ้าและการกระจายตัวของ CNT ในผ้ากาว ด้วยเทคนิค Synchrotron Radiation X-ray Tomographic Microscopy (SR-XTM)

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้ากาวที่ผ่านการชุบด้วยท่อนาโนคาร์บอน

จากการนำข้อไฟฟ้าที่ทำจากผ้ากาวชุบด้วย CNT วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Synchrotron Radiation X-ray Tomographic Microscopy (SR-XTM) จะเห็นได้ว่า ผ้ากาวมีลักษณะเป็นรูพรุนค่อนข้างมาก เนื่องมาจากการถักทอให้เป็นผ้า โดยจะแสดงให้เห็นในส่วนของผ้ากาวด้านที่ไม่มีกาว ดังภาพประกอบที่

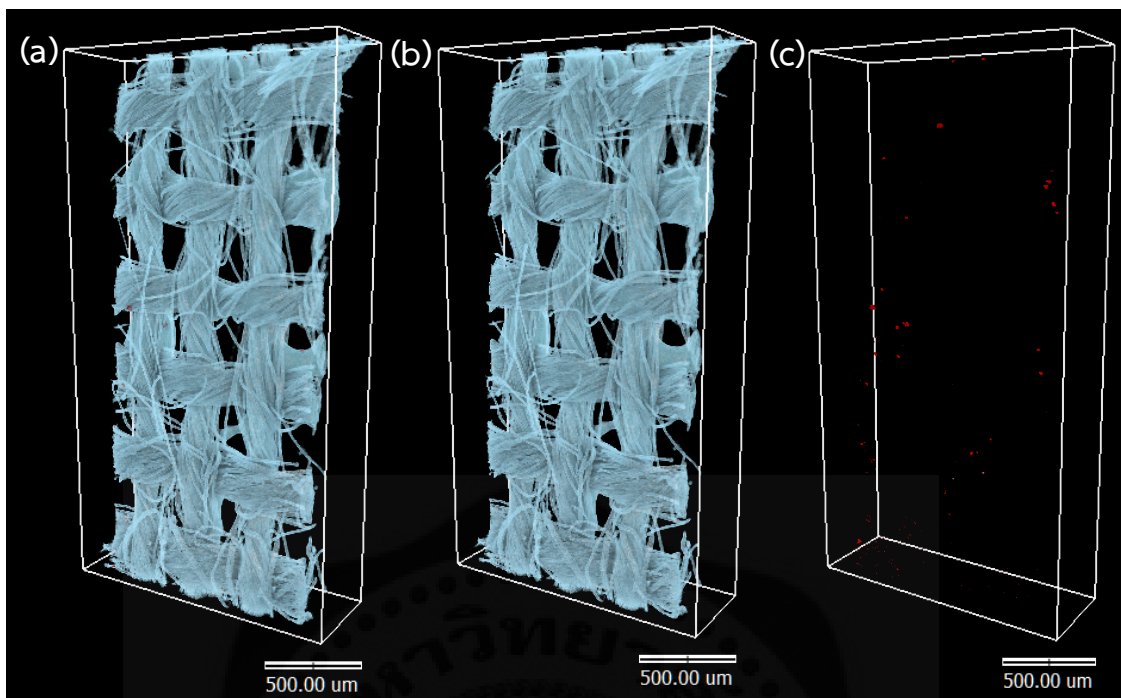
4.11 (a) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผ้ากาวส่วนที่มีกาวนั้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า มีเม็ดกาวซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ ดังภาพประกอบที่ 4.11 (b) โดยด้านที่มีกาวนี้ จะเป็นด้านที่นำไปติดติดกับผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสี และเมื่อทำการหมุน 90 องศา จะแสดงให้เห็นว่าทั้งสองด้านของผ้ากาว มีทั้งด้านที่มีกาว และด้านที่ไม่มีกาว ดังภาพประกอบที่ 4.11 (c)



ภาพประกอบที่ 4.11 (a) ผ้ากาวด้านที่ไม่มีกาว (b) ผ้ากาวด้านมีกาว และ(c) ภาพหมุน 90 องศาของผ้ากาว

4.3.2 การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในผ้ากาว

จากการนำข้อไฟฟ้าที่ทำจากผ้ากาวชุบด้วยท่อนาโนคาร์บอน (CNT) วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Tomographic Microscopy (XTM) จะมีการแยกเฟสของคอมโพสิตเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในผ้ากาว ซึ่งจะแสดงให้เห็นทั้ง 3 เฟส คือ เฟสผสม หรือ Mix phase ที่มีท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวอยู่ในผ้ากาว ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า มีตัวกระจายที่เป็นท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวอยู่ในเฟสหลัก ดังภาพประกอบที่ 4.12 (a) นอกจากนี้มีการแสดงให้เห็นเฟสกระจาย หรือ Disperse phase ที่เป็นการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในผ้ากาว ดังภาพประกอบที่ 4.12 (b) และแสดงให้เห็นเฟสหลักที่เป็นผ้ากาว ดังภาพประกอบที่ 4.12 (c)

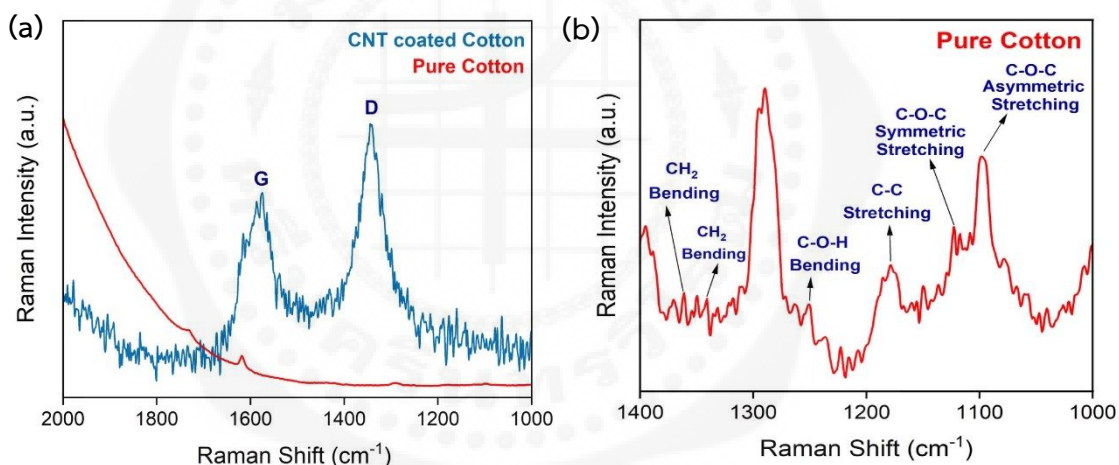


ภาพประกอบที่ 4.12 (a) เฟสผสม (Matrix phase) (b) เฟสกระจาย (Disperse phase) และ (c) เฟสหลัก (Matrix phase)

4.4 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เนื่องจาก CNT เกิดจากการนำแผ่นกราฟีน (Graphene) ม้วนงอให้เป็นรูปร่างท่อ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะจากออบิตัล sp^2 เป็นพันธะที่อยู่ระหว่าง sp^2 และ sp^3 จากการนำผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT ไปวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) พบว่า พิกที่แสดงถึงการมีอยู่ของ CNT ปรากฏที่แถบ D และแถบ G ซึ่งจะปรากฏอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง 1333 และ 1576 cm^{-1} ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 4.13 (a) โดยแถบ D คือ การสั่นพร้อมกันของอะตอม sp^2 ซึ่งเกิดจากความผิดปกติในโครงสร้างของคาร์บอนอสัณฐานใน CNT และแถบ G คือ การยืดหดของอะตอมคาร์บอน [21] ทำให้นักวิจัยนี้ สามารถยืนยันได้ว่าผ้าขาวมีการชุบด้วย CNT และส่วนของผ้าขาวที่ทำจากผ้าคอตตอน จากงานวิจัยของ Costa และคณะ [22] ที่ได้ทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผ้าคอตตอนด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี พบพิกหลักที่แสดงถึงเอกลักษณ์ความเป็นผ้าคอตตอนที่พิก 1092 cm^{-1} คือ การสั่นแบบยืดหดที่ไม่สมมาตรของหมู่ฟังก์ชัน C-O-C ที่พิก 1118 cm^{-1} คือการสั่นแบบยืดหดที่สมมาตรของหมู่ฟังก์ชัน C-O-C ที่พิก 1147 cm^{-1} คือการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C-C ที่พิก 1231 cm^{-1} คือการสั่นแบบดัดงอของหมู่ฟังก์ชัน C-O-H ที่พิก 1335 cm^{-1} คือการสั่นแบบดัดงอของหมู่ฟังก์ชัน CH_2 และ

ที่ 1376 cm^{-1} คือการสั่นแบบดัดงอของหมู่ฟังก์ชัน CH_2 จะเห็นได้ว่า พิกelihood ที่เป็นเอกลักษณ์ของผ้าคอตตอนทั้งหมดแสดงอยู่ในช่วง $1400 - 1000\text{ cm}^{-1}$ แต่เมื่อสังเกตจากเส้นกราฟของผ้าคอตตอนในภาพประกอบที่ 4.13 (a) พบว่า ไม่สามารถเห็นพิกelihood ที่เป็นเอกลักษณ์ของผ้าคอตตอนได้ เนื่องจาก Raman intensity ของผ้าคอตตอนต่ำกว่า Raman intensity ของผ้าคอตตอนที่ชุบด้วย CNT จึงต้องทำการขยายกราฟของผ้าคอตตอนที่ช่วง $1400 - 1000\text{ cm}^{-1}$ ดังภาพประกอบที่ 4.13 (b) เพื่อยืนยันว่าผ้าที่นำมาทำคอมโพสิต คือ ผ้าคอตตอน โดยเมื่อทำการขยายกราฟจะพบพิกelihood ที่แสดงถึงเอกลักษณ์ความเป็นผ้าคอตตอน ที่ 1098 cm^{-1} คือการสั่นแบบยืดหดที่ไม่สมมาตรของหมู่ฟังก์ชัน C-O-C ที่ 1122 cm^{-1} คือการสั่นแบบยืดหดที่สมมาตรของหมู่ฟังก์ชัน C-O-C ที่ 1178 cm^{-1} คือการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C-C ที่ 1250 cm^{-1} คือการสั่นแบบดัดงอของหมู่ฟังก์ชัน C-O-H ที่ 1340 cm^{-1} คือการสั่นแบบดัดงอของหมู่ฟังก์ชัน CH_2 และที่ 1361 cm^{-1} คือการสั่นแบบดัดงอของหมู่ฟังก์ชัน CH_2 เพราะฉะนั้น จากพิกelihood ทั้งหมดของผ้าขาว และผ้าขาวที่ชุบด้วย CNT ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า ขั้วไฟฟ้าของงานวิจัยนี้ เป็นคอมโพสิตระหว่างผ้าขาวและ CNT จริง

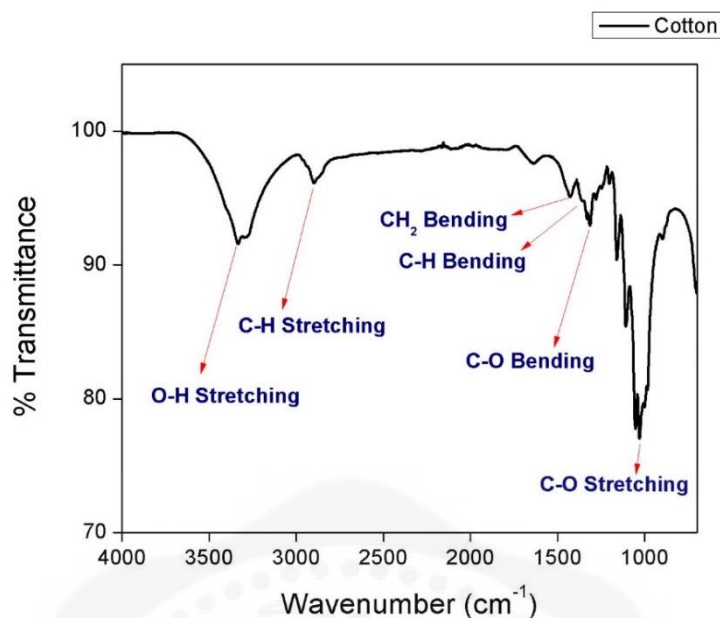


ภาพประกอบที่ 4.13 (a) สเปกตรัมรามานของ CNT (b) สเปกตรัมรามานของผ้าคอตตอนที่ขยายจากภาพประกอบ 4.13 (a) ที่ช่วง $1400 - 1000\text{ cm}^{-1}$

4.5 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของผ้าคอตตอนทั้งก่อนและหลังการย้อมสี ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR)

4.5.1 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของผ้าคอตตอนก่อนการย้อมสี

จากการนำผ้าคอตตอน (Cotton) ที่ผ่านการเตรียมด้วยการลอกแป้ง และการทำความสะอาด มาตรวจสอบและวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของผ้าคอตตอน ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $4000-700\text{ cm}^{-1}$ ก่อนที่จะนำผ้าคอตตอนนี้ไปย้อมด้วยสีย้อม ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพประกอบที่ 4.14 พบว่าพีคการดูดกลืนที่ 3335 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H (Hydroxyl group) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของผ้าคอตตอน พีคที่ 2897 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ส่วนการสั่นแบบดัดงอของพันธะ CH_2 และพันธะ C-O ตรงกับพีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1427 cm^{-1} และพีคที่ 1311 cm^{-1} ตามลำดับ และพีคการดูดกลืนที่ 1027 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Emanoel และคณะ [23] ที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะของผ้าคอตตอนด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี พบว่า พีค 3330 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H (Hydroxyl group) ที่พีค 2896 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ที่พีค 1428 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบดัดงอของพันธะ CH_2 ที่พีค 1360 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ที่พีค 1315 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบดัดงอของพันธะ C-O และที่พีค 1032 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O โดยจากพีคทั้งหมดที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับผ้าคอตตอนที่ผู้วิจัยนำไปวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะของผ้าคอตตอนด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี อีกทั้งมีหมู่ฟังก์ชันสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของผ้าคอตตอน [8] จึงสามารถสรุปได้ว่า ผ้าที่จะนำมาย้อมสีนั้น คือ ผ้าคอตตอน



ภาพประกอบที่ 4.14 รูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าคอตตอน

ตาราง 6 แสดงช่วงของการดูดกลืน รูปแบบการสั่น และพันธะของผ้าคอตตอน

ช่วงการดูดกลืน (cm^{-1})	รูปแบบการสั่นของพันธะ	หมู่ฟังก์ชัน/พันธะ
3335	การสั่นแบบยืดหด	O-H group
2897	การสั่นแบบยืดหด	C-H group
1427	การสั่นแบบดัดงอ	CH_2 group
1365	การสั่นแบบยืดหด	C-H group
1311	การสั่นแบบดัดงอ	C-O group
1027	การสั่นแบบยืดหด	C-O group

4.5.2 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ สีรีแอดทิฟ สีดไเรกท์ และสีเบสลิค

จากการนำสีย้อมรีแอดทิฟ มาทำการศึกษาและตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสีย้อมรีแอดทิฟ จำนวน 6 สี ได้แก่ สีนํ้าตาล สีนํ้าเงิน สีเขียว สีส้ม สีแดง และสีเหลือง ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $4000\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ แสดงให้ดังภาพประกอบที่ 4.15 ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมรีแอดทิฟทั้ง 6 สี ที่สามารถตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ดังนี้ สีย้อมรีแอดทิฟสีนํ้าตาล มีฟังก์ชันหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีย้อมรีแอดทิฟปรากฏขึ้นตรงกับช่วง

การดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3744 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของซีรีส์แอคทีฟ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1690 และ 1653 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1438 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่แอลเคน (Alkanes) พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1109 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน (Amines) และพีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 864 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบแอลิแฟติกเอมีน (Aliphatic amines compound) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Shreyas และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพีคการดูดกลืนระหว่างซีรีส์แอคทีฟสีน้ำตาลกับซีรีส์แอคทีฟสีน้ำตาลที่ถูกปรับปรุงด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี คือ C_2H_5 หมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี คือ NO_2 benzodithiophene-based π -spacer (BDTA) และ benzodithiophene-based π -spacer ที่เพิ่มด้วยกรดไซยาโนอะคริลิก (Cyanoacrylic acid or BDTA-A) พบว่า เมื่อพิจารณาพีคการดูดกลืนของซีรีส์แอคทีฟสีน้ำตาลจากงานวิจัยนี้ มีพีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1790 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1680 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1520 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H และพีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1249 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-N เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับการนำผงซีรีส์แอคทีฟสีน้ำตาลของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของซีรีส์แอคทีฟสีน้ำเงิน มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของซีรีส์แอคทีฟปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3744 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของซีรีส์แอคทีฟ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1690 และ 1646 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1437 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของ aromatic ring พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1128 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-NH₂ ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน I (Amine I) พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1027 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-NH₂ ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน I (Amine I) และพีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 864 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของ aromatic ring ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Holkar [25] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพีคการดูดกลืนระหว่างซีรีส์แอคทีฟสีน้ำเงินกับสารที่ได้รับหลังจากการทำให้สีลดลง พบว่า เมื่อพิจารณาพีคการดูดกลืนของซีรีส์แอคทีฟสีน้ำเงินจากงานวิจัยนี้ มีพีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 3423.65 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของ

พันธะ N-H พิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1689.34 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O พิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1118 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-NH₂ พิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1040 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-NH₂ พิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 870 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของ aromatic ring และจากงานวิจัยของ Shreyas และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพิกการดูดกลืนระหว่างสีย้อมที่ฟลูออโรกับสีย้อมที่ฟลูออโรที่ถูกปรับปรุงด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี คือ C₂H₅ หมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี คือ NO₂ benzodithiophene-based π -spacer (BDTA) และ benzodithiophene-based π -spacer ที่เพิ่มด้วยกรดไซยาโนอะคริลิก (Cyanoacrylic acid or BDTA-A) พบว่า มีพิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1672 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O และพิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1520 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของ aromatic ring เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยข้างต้น มีผลการวิเคราะห์ที่มีความใกล้เคียงกับการนำผลสีย้อมที่ฟลูออโรของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีย้อมที่ฟลูออโร มีพิกของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีย้อมที่ฟลูออโรปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3744 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีย้อมที่ฟลูออโร นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1646 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1571 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N=N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอโซ (Azo group) พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1418 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่แอลเคน (Alkanes) พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1020 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ P-O (Aliphatic phosphate) และพิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 858 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบเอลิแฟติกเอมีน (Aliphatic amines compound) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Das และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพิกการดูดกลืนระหว่างสีย้อมที่ฟลูออโรกับสารที่ได้รับหลังจากการทำให้สีย้อมตกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า เมื่อพิจารณาพิกการดูดกลืนของสีย้อมที่ฟลูออโรจากงานวิจัยนี้ มีพิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 3488.53 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H พิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1745.56 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O พิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1630 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N=N พิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1455.68 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H และพิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1016.91 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ P-O

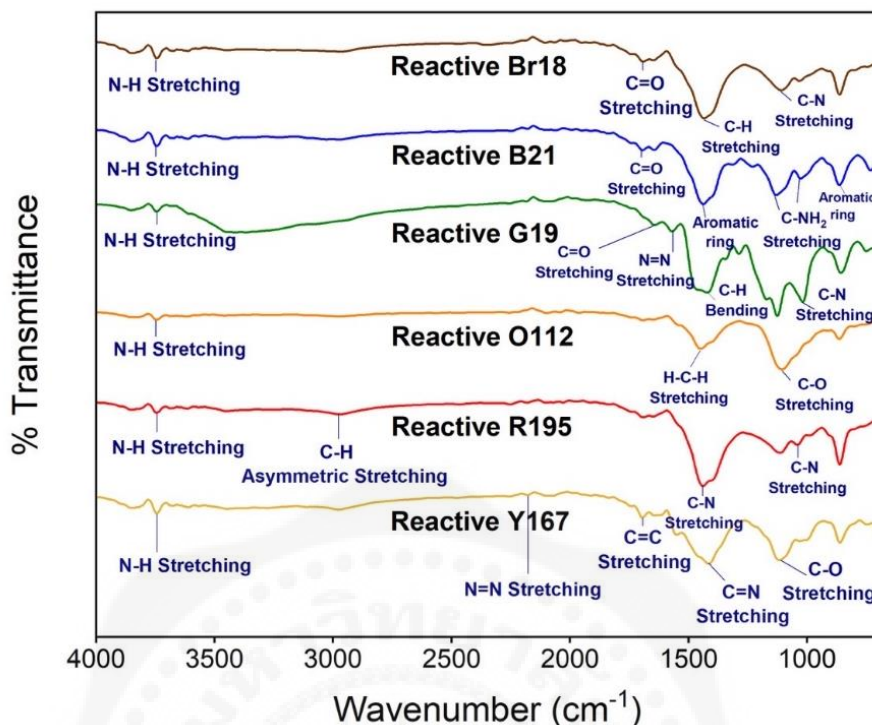
(Aliphatic phosphate) เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับการนำผงสีรีแอคทีฟสีเขียวของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีรีแอคทีฟสีส้ม มีพิกของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีรีแอคทีฟปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3744 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีรีแอคทีฟ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1450 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ H-C-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่แอลเคน (Alkanes) พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1106 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอสเทอร์ (Esters) และพิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 864 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบแอลิแฟติกเอมีน (Aliphatic amines compound) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Werede และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพิกการดูดกลืนระหว่างสีรีแอคทีฟสีส้มกับสีย้อมสังเคราะห์ Gunda Gundo orange peel powder based carotenoid (GGC) พบว่า เมื่อพิจารณาพิกการดูดกลืนของสีรีแอคทีฟสีส้มจากงานวิจัยนี้ มีพิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1454.33 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ H-C-H และจากงานวิจัยของ Zubair และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพิกการดูดกลืนระหว่างสีรีแอคทีฟสีส้มกับสีรีแอคทีฟสีส้มที่ผ่านการย่อยสลายแล้ว พบว่า เมื่อพิจารณาพิกการดูดกลืนของสีรีแอคทีฟสีส้มจากงานวิจัยนี้ มีพิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1112 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยข้างต้น มีความใกล้เคียงกับการนำผงสีรีแอคทีฟสีส้มของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีรีแอคทีฟสีแดง มีพิกของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีรีแอคทีฟปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3744 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีรีแอคทีฟ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 2973 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของ aliphatic -CH ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่แอลิแฟติก (Aliphatic group) พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1443 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน (Amines) พิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1037 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน (Amines) และพิกการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 864 cm^{-1} เป็นพิกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบแอลิแฟติกเอมีน (Aliphatic amines compound) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Calderón และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพิกการดูดกลืนระหว่างสีรีแอคทีฟสีแดง ไคโตซานที่ไม่ผ่านการย้อมสี และไคโตซานที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีแดง พบว่า เมื่อพิจารณาพิกการดูดกลืนของสีรีแอคทีฟสีแดงจากงานวิจัยนี้ มีพิกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น $3650\text{--}3328\text{ cm}^{-1}$

ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H พีการดุดกลืนช่วงความยาวคลื่น $2915-2855\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของ aliphatic -CH พีการดุดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1492 และ 1394 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-N เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยข้างต้น มีความใกล้เคียงกับการนำผงสีรีแอคทีฟสีแดงของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีรีแอคทีฟสีเหลือง มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีรีแอคทีฟปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดุดกลืนที่ความยาวคลื่น 3744 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีรีแอคทีฟ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พีการดุดกลืนที่ความยาวคลื่น 2177 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N=N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอไซด์ (Azides group) พีการดุดกลืนที่ความยาวคลื่น 1697 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=C ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่แอลคีน (Alkenes) พีการดุดกลืนที่ความยาวคลื่น 1412 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ไอมีน (Imines) พีการดุดกลืนที่ความยาวคลื่น 1112 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอสเทอร์ (Esters) และพีการดุดกลืนที่ความยาวคลื่น 864 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบแอลิแฟติกเอมีน (Aliphatic amines compound) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Patil และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพีการดุดกลืนระหว่างสีรีแอคทีฟสีเหลืองกับสีรีแอคทีฟสีเหลืองหลังจากนำไปย่อยสลายในไมโครเวฟ พบว่า เมื่อพิจารณาพีการดุดกลืนของสีรีแอคทีฟสีเหลืองจากงานวิจัยนี้ มีพีการดุดกลืนช่วงความยาวคลื่น $3550-3330\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H พีการดุดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1496.99 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=N พีการดุดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1256 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O และจากงานวิจัยของ Kiran และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพีการดุดกลืนระหว่างสีรีแอคทีฟสีเหลืองก่อนและหลัง catalytic treatment พบว่า เมื่อพิจารณาพีการดุดกลืนของสีรีแอคทีฟสีเหลืองจากงานวิจัยนี้ มีพีการดุดกลืนช่วงความยาวคลื่น 2352.21 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N=N พีการดุดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1646.3 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=C เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยข้างต้น มีความใกล้เคียง และคล้ายคลึงกับการนำผงสีรีแอคทีฟสีเหลืองของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี



ภาพประกอบที่ 4.15 รูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมรีแอคทีฟ

จากการนำสีย้อมไดเรกต์ มาทำการศึกษาและตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสีย้อมไดเรกต์ จำนวน 5 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน สีเขียว สีส้ม สีแดง และสีเหลือง ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $4000-700 \text{ cm}^{-1}$ แสดงให้ดังภาพประกอบที่ 4.16 ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมทั้ง 5 สี ที่สามารถตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ดังนี้ สีย้อมไดเรกต์สีนํ้าเงิน มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีย้อมปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3385 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีย้อมไดเรกต์ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1588 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน (Amines) และพีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1039 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอสเทอร์ (Esters) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Juan และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพีคการดูดกลืนระหว่างสีย้อมไดเรกต์สีนํ้าเงินกับสีย้อมไดเรกต์สีนํ้าเงินที่ถูกปรับปรุงด้วยกรดอัลจินิก (Alginate acid) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้มาจากสาหร่ายสีน้ำตาล พบว่า เมื่อพิจารณาพีคการดูดกลืนของไดเรกต์สีนํ้าเงินจากงานวิจัยนี้ มีพีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 3425 และ 3290 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบสมมาตรและไม่สมมาตรของพันธะ N-H ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1565 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ

C=N และที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1045 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับการนำผงสีไธเรกท์สีน้ำเงินของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีไธเรกท์สีเขียว มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีไธเรกท์ปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3333 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1546 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบดัดงอของพันธะ C=O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1326 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบดัดงอของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีไธเรกท์ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) และที่พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1112 และ 1029 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอสเทอร์ (Esters) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Olugbenga [33] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพีคการดูดกลืนระหว่างสีไธเรกท์สีเขียว กับสีไธเรกท์สีเขียวที่ถูกปรับปรุงด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมมาจากเส้นใย พบว่า เมื่อพิจารณาพีคการดูดกลืนของสีไธเรกท์สีเขียวจากงานวิจัยนี้ มีพีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 3391 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 2920 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1635 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบดัดงอของพันธะ N-H และพีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1033 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับการนำผงสีไธเรกท์สีเขียวของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

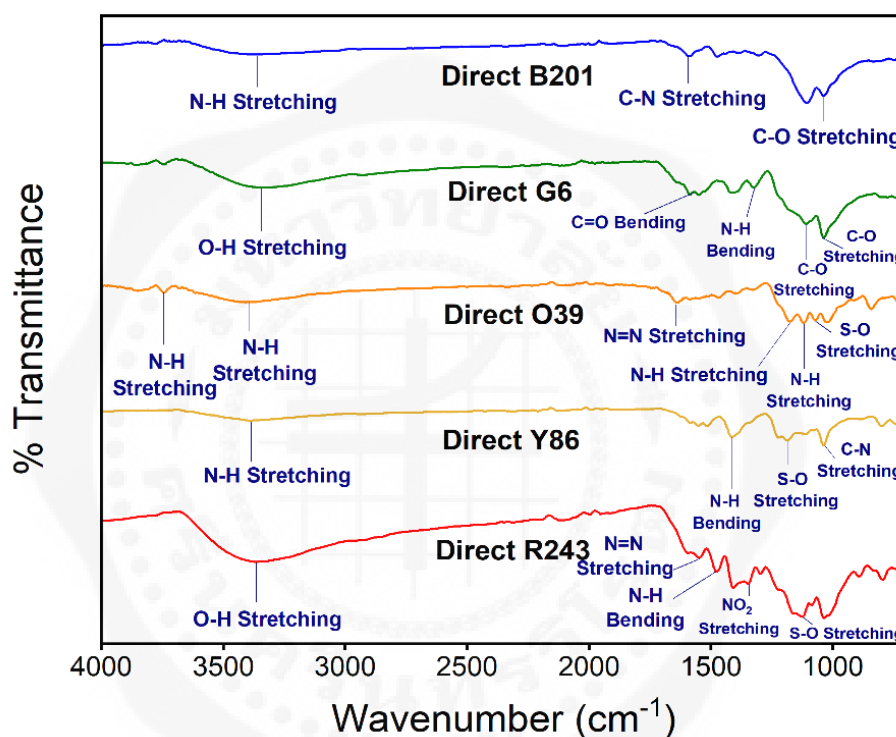
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีไธเรกท์สีส้ม มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีไธเรกท์ปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3740 และ 3395 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีไธเรกท์ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1645 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N=N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอโซ (Azo group) พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1175 และ 1118 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน (Amines) และที่พีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1071 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ S-O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide group) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Singh และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพีคการดูดกลืนระหว่างสีไธเรกท์สีส้ม กับสีไธเรกท์สีส้มที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพด้วย *Micrococcus luteus* strain SSN2 พบว่า เมื่อพิจารณาพีคการดูดกลืนของสีไธเรกท์สีส้มจากงานวิจัยนี้ มีพีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 2960 และ 2933 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1670 และ 1620 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O

และที่พีการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1220 และ 1193 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับการนำผงสีไธเรกต์สีส้มของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีไธเรกต์สีแดง มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีไธเรกต์ปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3355 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่พีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1547 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N=N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอโซ (Azo group) พีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1475 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบดัดงอของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีไธเรกต์ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1343 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ NO_2 ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ไนโตร (Nitro group) และที่พีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1124 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ S-O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide group) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Alica และคณะ [35] ได้ทำการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่างของสีย้อมที่เป็นพิษ ซึ่งมีสีไธเรกต์สีแดงประกอบอยู่ พบว่า เมื่อพิจารณาพีการดูดกลืนของสีไธเรกต์สีแดงจากงานวิจัยนี้ มีพีการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 3321 และ 3174 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H ที่พีการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1612 และ 1531 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N=N ที่พีการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1336 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ NO_2 และพีการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1196 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ S-O เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับการนำผงสีไธเรกต์สีแดงของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของสีไธเรกต์สีเหลือง มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีไธเรกต์ปรากฏขึ้นตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 3369 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันหลักของสีไธเรกต์ นั่นคือ หมู่เอมีน (Amines) ที่พีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1415 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบดัดงอของพันธะ N-H ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน (Amines) พีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1185 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ S-O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ซัลฟอกไซด์ (Sulfoxide group) และที่พีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1035 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-N ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีน (Amines) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Fabiano และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพีการดูดกลืนระหว่างสีไธเรกต์สีเหลืองกับสีไธเรกต์สีเหลืองที่ถูกปรับปรุงด้วยถ่านกัมมันต์ของเปลือกกะลาปาล์ม พบว่า เมื่อพิจารณาพีการดูดกลืนของสีไธเรกต์สีเหลืองจากงานวิจัยนี้ มีพีการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 3460 cm^{-1} เป็นพีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N-H ที่พีการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 2923, 1639, 1455,

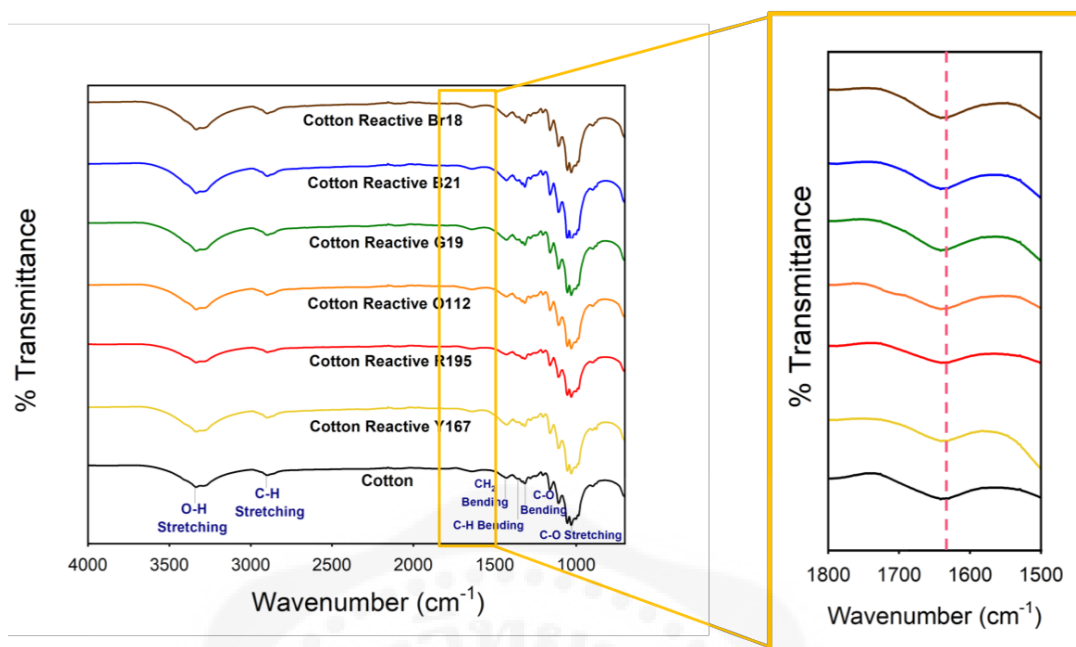
1059 และ 618 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นของพันธะ C=C ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 2854 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 2590 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ N=N ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1480 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบดัดงอของพันธะ N-H ที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1385 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบดัดงอของพันธะ C-H และที่พีคการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่น 1354 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ S-O เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับการนำผงสีไคเรทส์สีเหลืองของผู้วิจัยไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี



ภาพประกอบที่ 4.16 รูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมไคเรทส์

4.5.3 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของผ้า คอตตอนหลังการย้อมด้วยสีซินิตรีแอคทีฟ

หลังจากตรวจสอบและวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผ้าคอตตอนก่อนการย้อมสีแล้ว เมื่อนำผ้า คอตตอนไปย้อมด้วยสีย้อมซินิตรีแอคทีฟ จะทำการตรวจสอบและวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันเอกลักษณ์ของสี ย้อมที่ติดอยู่บนผ้าคอตตอน ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบระหว่างผ้าคอตตอนก่อนการย้อมสี และผ้าคอตตอน ที่ผ่านการย้อมสีซินิตรีแอคทีฟ โดยแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.17



ภาพประกอบที่ 4.17 แสดงรูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ

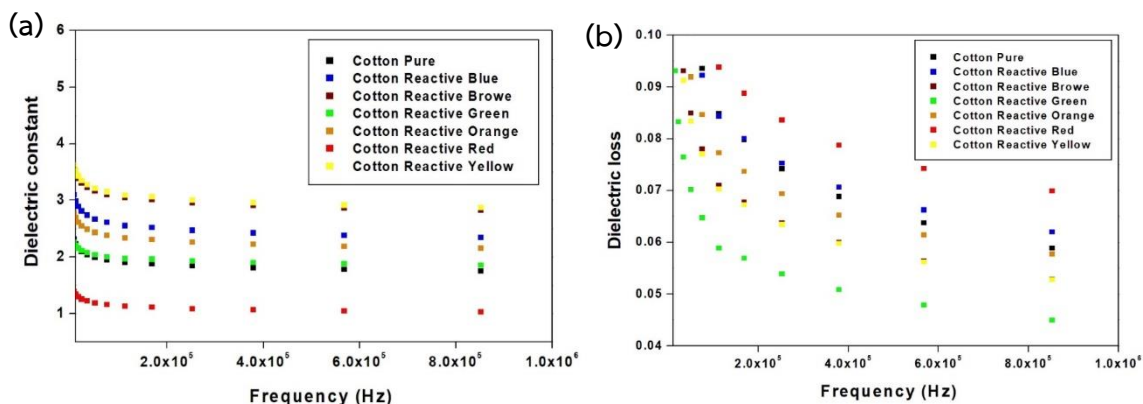
จากภาพประกอบที่ 4.17 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบรูปแบบพีคการดูดกลืนของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 6 สี เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วจะพบว่าทั้งพีคการดูดกลืนของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการย้อมสี มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก ซึ่งแสดงถึงการไม่พบพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของสีย้อมรีแอคทีฟ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Fang-Ne He และคณะ (37) ได้ทำการศึกษา และทำการเปรียบเทียบพีคการดูดกลืนของผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ และผ้าคอตตอนที่ทำ stripping ในระบบ UV/ Na_2SO_4 หลังจากผ่านการย้อมสี โดยพบว่าทั้ง 2 กรณี มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสีย้อมรีแอคทีฟปรากฏขึ้น ซึ่งตรงกับช่วงการดูดกลืนที่ 1630 cm^{-1} จึงสามารถยืนยันได้ว่ามีสีย้อมรีแอคทีฟติดบนผ้าคอตตอนในทั้ง 2 กรณี โดยเมื่อพิจารณาพีคการดูดกลืนของผ้าคอตตอนก่อนและหลังการย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟอย่างละเอียด ด้วยการขยาย (Zoom) พีคเข้าไปในช่วงการดูดกลืนตั้งแต่ $1800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ จึงพบว่าพีคการดูดกลืนแสดงพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสีย้อมรีแอคทีฟ ที่สอดคล้องกับช่วงการดูดกลืนที่ 1640 cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Fang-Ne He และคณะ [37] นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าพีคการดูดกลืนในช่วงนี้ของผ้าคอตตอนที่ย้อมสีย้อมรีแอคทีฟเกิดการเลื่อน (Shift) ไปจากพีคการดูดกลืนของผ้าคอตตอนก่อนการย้อมสี ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14 จึงสามารถยืนยันได้ว่าสีย้อมรีแอคทีฟติดอยู่บนผ้าคอตตอนจริง แต่อย่างไรก็ตาม อาจจะมีปริมาณที่น้อย จึงส่งผลให้พีคการดูดกลืนที่แสดงออกมานั้นเห็นได้ไม่ชัดเจน

4.6 ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี และผ้าคอตตอนผ่านการย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) สีย้อมตรง (Direct dyes) และสีย้อมเบสิก (Basic dyes)

4.6.1 ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Cotton Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี

จากการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Cotton Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี คือ สีนํ้าเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง ด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR Meter) โดยภาพประกอบที่ 4.18 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ พบว่าผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟสีเขียว, สีส้ม, สีนํ้าเงิน, สีนํ้าตาล และสีเหลือง มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี โดยที่ผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสีนั้นแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 1.75-1.90 ซึ่งจากงานวิจัยของ Yusuke และคณะ [38] ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของผ้าคอตตอน พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของผ้าคอตตอนจะอยู่ในช่วง 1.0-2.1 โดยที่ผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟสีเหลือง แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดอยู่ในช่วง 2.87-3.10 และเริ่มคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

เมื่อทำการตรวจสอบค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ที่แสดงดังภาพประกอบที่ 4.18 (b) พบว่าผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.05-0.09 และพบว่าผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟสีเขียว, สีส้ม, สีนํ้าเงิน, สีนํ้าตาล และสีเหลือง มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี โดยที่ผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟสีเขียวแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ที่ต่ำที่สุดจากสีทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.04-0.06

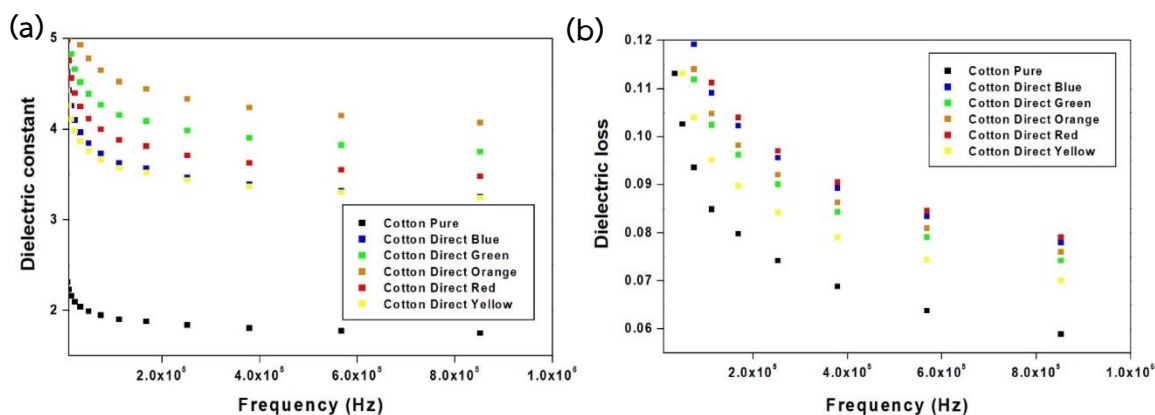


ภาพประกอบที่ 4.18 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Cotton Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี คือ สีน้ำเงิน, สีน้ำตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง

4.6.2 ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีไดเรกต์ (Cotton Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี

จากการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีไดเรกต์ (Cotton Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี คือ สีน้ำเงิน, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง ด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR Meter) โดยภาพประกอบที่ 4.19 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีไดเรกต์ พบว่าผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีไดเรกต์ (Direct dyes) ทั้ง 5 สี แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี โดยที่ผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีไดเรกต์สีส้ม แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดอยู่ในช่วง 4.07-4.65 และเริ่มคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

เมื่อทำการตรวจสอบค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ที่แสดงดังภาพประกอบที่ 4.19 (b) พบว่าผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีไดเรกต์ (Direct dyes) ทั้ง 5 สี แสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี ประมาณ 0.01-0.02 โดยที่ผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีไดเรกต์สีเหลืองแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ที่ต่ำที่สุดจากสีทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.07-0.09

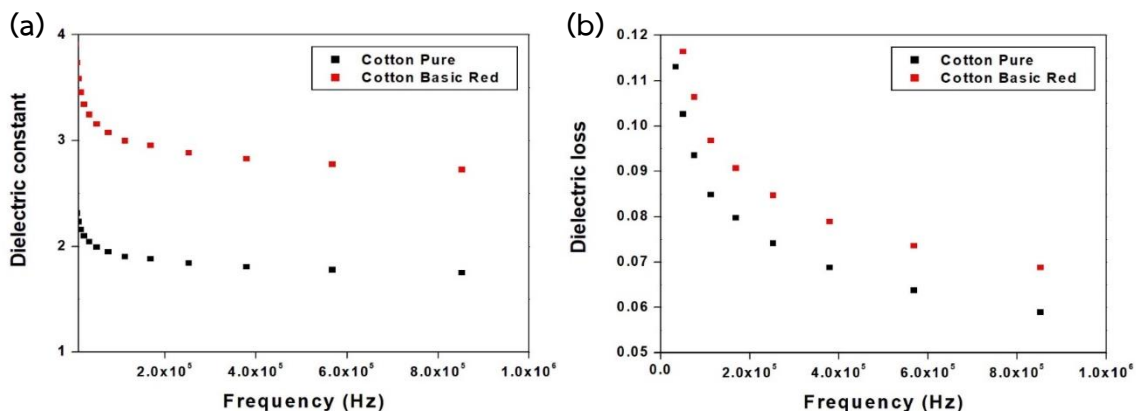


ภาพประกอบที่ 4.19 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีย้อมสี (Cotton Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี คือ สีน้ำเงิน, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง

4.6.3 ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีเบสิก (Cotton Basic dyes) สีแดง

จากการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีเบสิก (Cotton Basic dyes) สีแดงด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR Meter) โดยภาพประกอบที่ 4.20 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีเบสิก พบว่าผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีเบสิก (Basic dyes) สีแดงแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี โดยอยู่ในช่วง 2.72-3.08 และเริ่มคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

เมื่อทำการตรวจสอบค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ที่แสดงดังภาพประกอบที่ 4.20 (b) พบว่าผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีเบสิก (Basic dyes) สีแดงแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี โดยอยู่ในช่วง 0.06-0.61

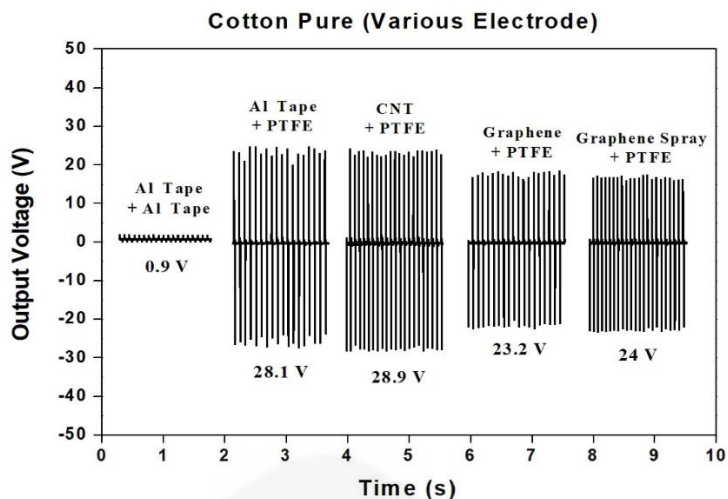


ภาพประกอบที่ 4.20 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ของผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี (Cotton Pure) และผ้าคอตตอนที่ย้อมสีด้วยสีเบสิก (Cotton Basic dyes) สีแดง

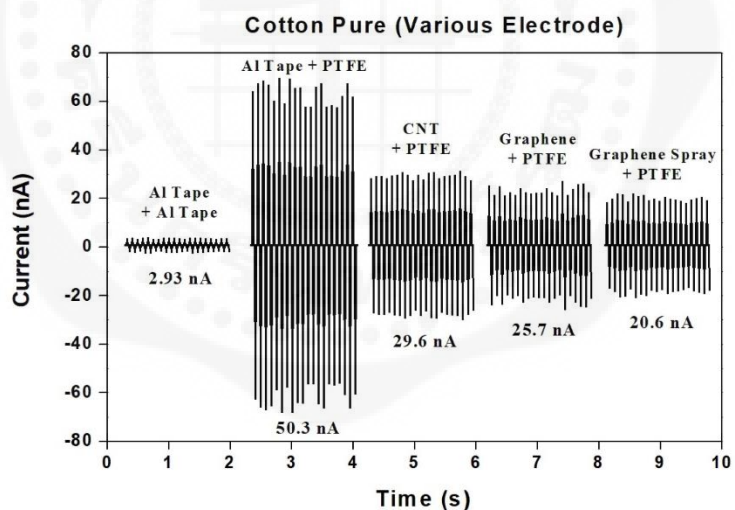
4.7 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า

4.7.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอนโดยเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า

การศึกษาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ภายใต้รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Contact-separation mode) โดยชั้นสัมผัสทั้งสอง คือ ผ้าคอตตอน และพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) หรือ เทฟลอน (Teflon; ชื่อทางการค้าของดुปองท์) โดยเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า (Electrode) 4 ชนิด คือ เทปอะลูมิเนียม (Aluminum tape), ผ้ากาวชุบด้วยท่อโนคาร์บอน (CNT electrode), ผ้ากาวชุบด้วยกราฟีน (Graphene electrode) และผ้ากาวฉีดเคลือบด้วยกราฟีน (Graphene spray electrode)



ภาพประกอบที่ 4.21 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ของผ้าคอตตอน โดยเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า (Electrode) 4 ชนิด คือ เทปอะลูมิเนียม (Aluminum tape), ผ้าการชุบด้วยท่อนาโนคาร์บอน (CNT electrode), ผ้าการชุบด้วยกราฟีน (Graphene electrode) และผ้าการฉีดยาด้วยกราฟีน (Graphene spray electrode)

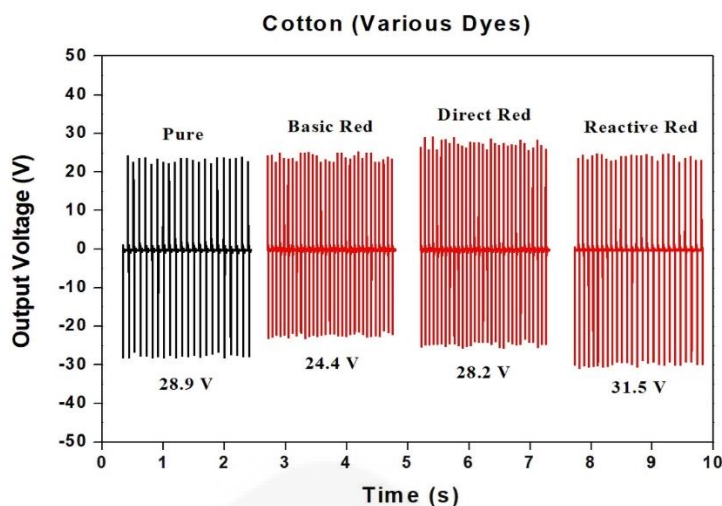


ภาพประกอบที่ 4.22 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน โดยเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า (Electrode) 4 ชนิด คือ เทปอะลูมิเนียม (Aluminum tape), ผ้าการชุบด้วยท่อนาโนคาร์บอน (CNT electrode), ผ้าการชุบด้วยกราฟีน (Graphene electrode) และผ้าการฉีดยาด้วยกราฟีน (Graphene spray electrode)

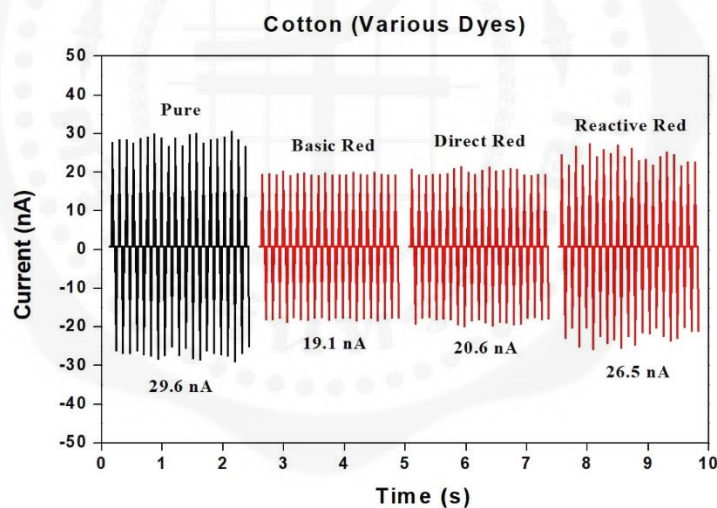
จากภาพประกอบที่ 4.21 และ 4.22 แสดงให้เห็นว่า Aluminum tape นั้นให้ค่าการส่งออกจากไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก ที่สูงที่สุด คือ 28.1 V และ 50.3 nA ตามลำดับ แต่เนื่องจากปัญหาในเรื่องการยึดติดกับผ้าที่ไม่ดี จึงเลือกพิจารณาขั้วไฟฟ้าที่ได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นมาสำหรับใช้งานกับผ้าคอตตอน คือ CNT electrode, Graphene electrode และ Graphene spray electrode พบว่า CNT electrode นั้นแสดงที่สูงที่สุดในกลุ่มดังกล่าว โดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 28.9 V และ 29.6 nA ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Bernardo และคณะ [39] ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของ กราฟีน (Graphene) และ ท่อคาร์บอนนาโนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNT) พบว่า MWCNT แสดงค่า Electrical conductivity ที่ $5.43 \times 10^2 (1 \cdot (\Omega m^{-1}))$ ที่สูงกว่า Graphene ที่พบค่า Electrical conductivity ที่ $2.62 \times 10^2 (1 \cdot (\Omega m^{-1}))$ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Ian และคณะ [40] ที่ทำการศึกษาภาพรวมของคอมโพสิตระหว่าง CNT และ Graphene ที่มีการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ CNT และ Graphene ในการทำคอมโพสิต พบว่า คอมโพสิตที่ใช้ CNT 0.15 wt% แสดงค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าการใช้ Graphene ที่ 1 wt% เนื่องจาก CNT มีโครงสร้างแบบ 1 มิติ (One dimensional; 1D) จึงทำให้มีโครงข่ายในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า Graphene ซึ่งมีโครงสร้างแบบ 2 มิติ (Two dimensional; 2D) จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่า Electrical conductivity ที่สูงกว่า และโครงสร้างแบบ 1 มิติ ของ ส่งผลให้ค่าการส่งออกจากไฟฟ้าที่ได้จากผ้ากาวที่ชุบด้วย CNT มากกว่าการใช้ผ้ากาวที่ชุบด้วย Graphene

4.7.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกจากไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสี ด้วยสีย้อมสีแดง (Red dyes) ชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไตรเรกต์ (Direct dyes) และเบสิค (Basic dyes)

การศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์จากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ภายใต้รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Contact-separation mode) โดยชั้นสัมผัสทั้งสอง คือ ผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี และผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีด้วยสีแดง (Red dyes) ของสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไตรเรกต์ (Direct dyes) และเบสิค (Basic dyes) ส่วนชั้นสัมผัสอีกด้านคือ เทฟลอน (Teflon) โดยใช้ CNT electrode เป็นขั้วไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 4.23 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) โดยเปรียบเทียบระหว่างผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี กับผ้าคอตตอนผ่านการย้อมสีด้วยสีแดง (Red dyes) ของสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไตรเรกต์ (Direct dyes) และเบสิค (Basic dyes)



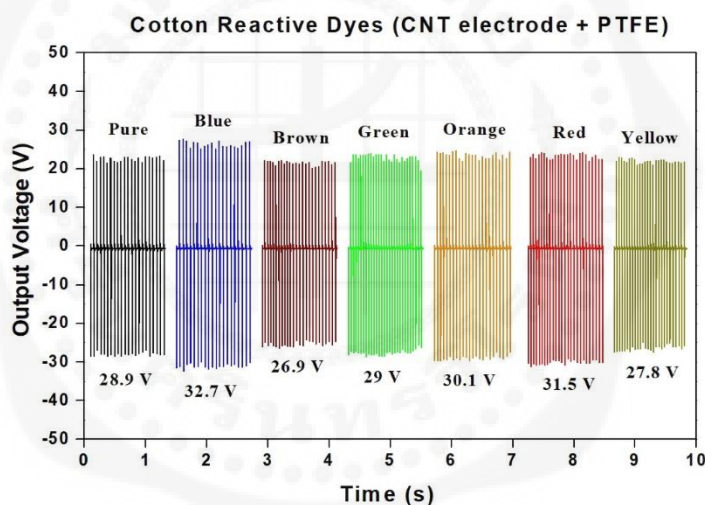
ภาพประกอบที่ 4.24 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) โดยเปรียบเทียบระหว่างผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี กับผ้าคอตตอนผ่านการย้อมสีด้วยสีแดง (Red dyes) ของสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไตรเรกต์ (Direct dyes) และเบสิค (Basic dyes)

จากภาพประกอบที่ 4.23 และ 4.24 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบระหว่างผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี กับผ้าคอตตอนผ่านการย้อมสีด้วยสีแดง (Red dyes) ของสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (Reactive dyes), ไตรเรกต์ (Direct dyes) และเบสิค (Basic dyes) พบว่าสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ และสีย้อมชนิดไตรเรกต์แสดงค่า

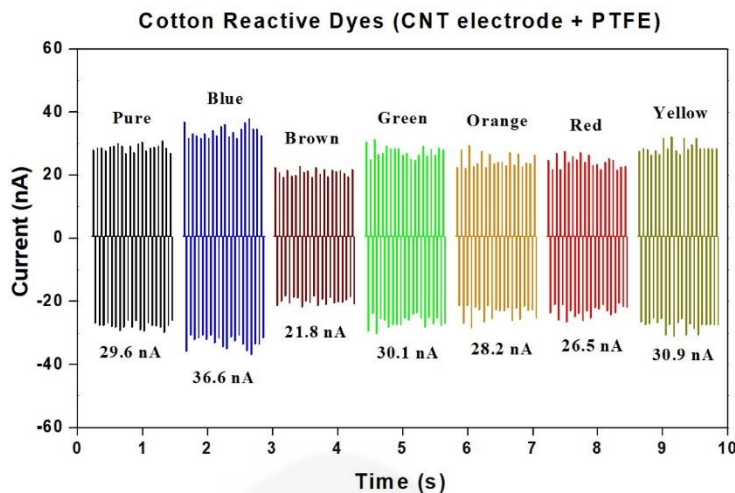
แรงดันไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงกว่าสีย้อมชนิดเบสิค ผู้วิจัยจึงเลือกทำการศึกษา และทำการวิจัยด้วยการใช้สีย้อมรีแอคทีฟ และสีย้อมเรกต์ต่อเท่านั้น นอกจากนี้สีย้อมชนิดเบสิคยังมีราคาสูง

4.7.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี

การศึกษากลยุทธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอีเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ภายใต้รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Contact-separation mode) โดยชั้นสัมผัสทั้งสอง คือ ผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี และผ้าคอตตอนผ่านการย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ส่วนชั้นสัมผัสอีกด้านคือ เทฟลอน (Teflon) โดยใช้ CNT electrode เป็นขั้วไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 4.25 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีน้าเงิน, สีน้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง



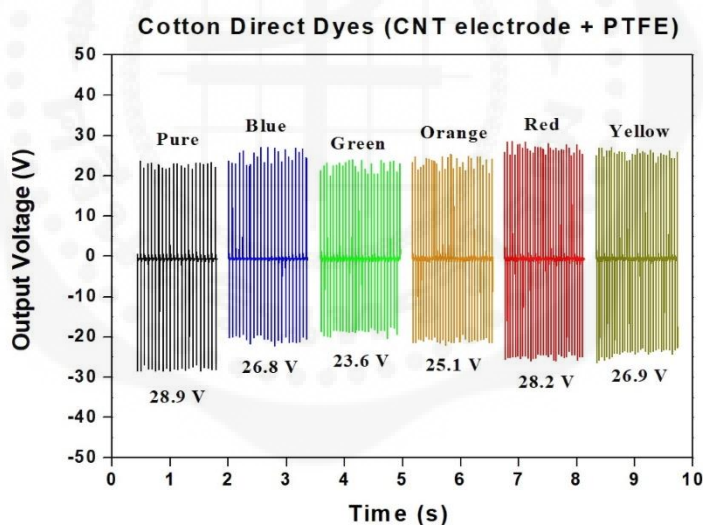
ภาพประกอบที่ 4.26 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง

จากภาพประกอบที่ 4.25 และ 4.26 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) โดยผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี แสดงค่าสูงสุดที่ 28.9 V และ 29.6 nA ตามลำดับ ส่วนผ้าคอตตอนผ่านการย้อมสีด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 32.7 V, 26.9 V, 29 V, 30.1 V, 31.5 V และ 27.8 V ตามลำดับ และแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 36.6 nA, 21.8 nA, 30.1 nA, 28.2 nA, 26.5 nA และ 30.9 nA ตามลำดับ ซึ่งผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟสีนํ้าเงินแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่มากที่สุด คือ 32.7 V และ 36.6 nA ตามลำดับ เนื่องจากภายในโครงสร้างของสีย้อมรีแอคทีฟสีนํ้าเงิน (Reactive Blue) นั้น เป็นสีเดียวที่มีอะตอมของทองแดง (Copper; Cu) ที่มีค่า EN ต่ำอยู่ในโครงสร้าง ทำให้มีประจุเป็นบวก ซึ่งจากปรากฏการณ์ Inductive Effect ทำให้ที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี ส่งผลให้อยู่ในฝั่งที่มีความเป็นบวก [52] ดังนั้น ผ้าคอตตอนผ่านการย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟสีนํ้าเงินจึงถูกปรับปรุงให้มีความเป็นบวกสูงขึ้น เมื่อสัมผัสกับเทฟลอน (Teflon) ที่มีความเป็นลบสูง ทำให้เกิดความต่างระหว่างความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนของชั้นสัมผัสทั้งสองที่สูงขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าการส่งออกจากไฟฟ้าสูงขึ้น [7] นอกจากนี้ยังเป็นสีเดียวในกลุ่มสีย้อมรีแอคทีฟที่ไม่มีอะตอมของคลอรีน (Chlorine; Cl) ซึ่งมีค่า EN สูงอยู่ในโครงสร้าง โดย Cl มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี ส่งผลให้อยู่ในฝั่งที่มีความเป็นลบ [52] ซึ่งผู้วิจัยต้องการปรับปรุงให้ผ้าคอตตอนมีความเป็นบวกสูงขึ้น ดังนั้น Cl ที่ส่งผลให้ผ้าคอตตอนที่มีความเป็นลบ

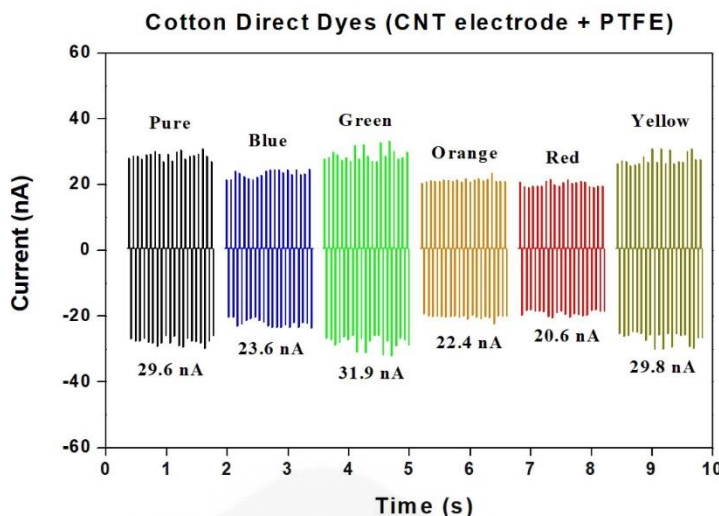
สูงขึ้น เมื่อสัมผัสกับชั้นสัมผัสเทฟลอนที่มีความเป็นลบสูง ส่งผลให้ได้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่ต่ำ เห็นได้จากผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีน้ำตาล (Reactive Brown) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกที่ต่ำที่สุดคือที่ 26.9 V และ 21.8 nA ตามลำดับ เนื่องจากภายในโครงสร้างของสีรีแอคทีฟสีน้ำตาลนั้นมีอะตอมของ Cl ที่มีความเป็นลบอยู่ในโครงสร้างมากกว่าสีอื่นๆ ในกลุ่มสีรีแอคทีฟ

4.7.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีไดเรกต์ (Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี

การศึกษาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ภายใต้รูปแบบการสัมผัสแบบตึงฉีก (Contact-separation mode) โดยชั้นสัมผัสทั้งสอง คือ ผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี และผ้าคอตตอนผ่านการย้อมสีด้วยสีไดเรกต์ (Direct dyes) ส่วนชั้นสัมผัสอีกด้านคือ เทฟลอน (Teflon) โดยใช้ CNT electrode เป็นขั้วไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 4.27 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยไดเรกต์ (Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี ได้แก่ สีน้ำเงิน, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง



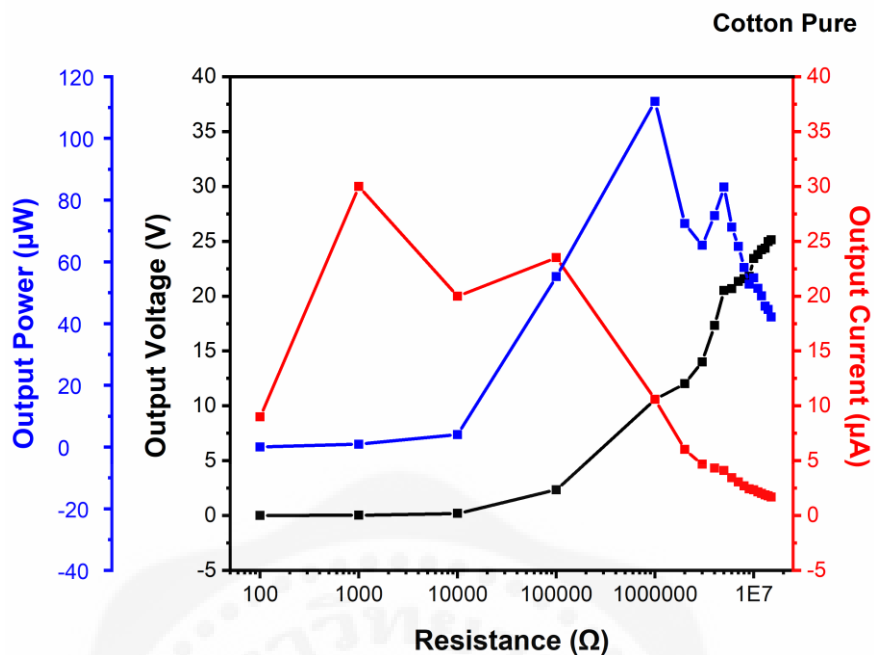
ภาพประกอบที่ 4.28 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยไดเรกต์ (Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง

จากภาพประกอบที่ 4.27 และ 4.28 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) โดยผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี แสดงค่าสูงสุดที่ 28.9 V และ 29.6 nA ตามลำดับ ส่วนผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีด้วยสีไดเรกต์ (Direct dyes) ทั้งหมด 5 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 26.8 V, 23.6 V, 25.1 V, 28.2 V และ 26.9 V ตามลำดับ และแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 21.8 nA, 30.1 nA, 28.2 nA, 26.5 nA และ 30.9 nA ตามลำดับ ซึ่งผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีไดเรกต์สีเขียว (Reactive Green) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก สูงสุดที่มากที่สุด คือ 31.9 nA เนื่องจากในโครงสร้างทางเคมีของสีไดเรกต์สีเขียวเป็นสีเดียวที่ปรากฏหมู่เอมีน (NH_2) หรือหมู่ฟังก์ชันหลักของสีย้อมแสดงอยู่ในโครงสร้างมากกว่าสีอื่นๆ ซึ่งจากปรากฏการณ์ Inductive Effect พบว่า NH_2 มีประจุเป็นบวก ทำให้สามารถให้อิเล็กตรอนได้ดี ดังนั้น NH_2 จึงอยู่ในฝั่งที่มีความเป็นบวก [52] ทำให้ผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีไดเรกต์สีเขียวถูกปรับปรุงให้มีความเป็นบวกสูงขึ้น เมื่อสัมผัสกับชั้นสัมผัสเพปลอนที่มีความเป็นลบสูง ส่งผลให้ได้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่สูงเป็นผลมาจากความต่างของความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนของชั้นสัมผัสทั้งสอง [7]

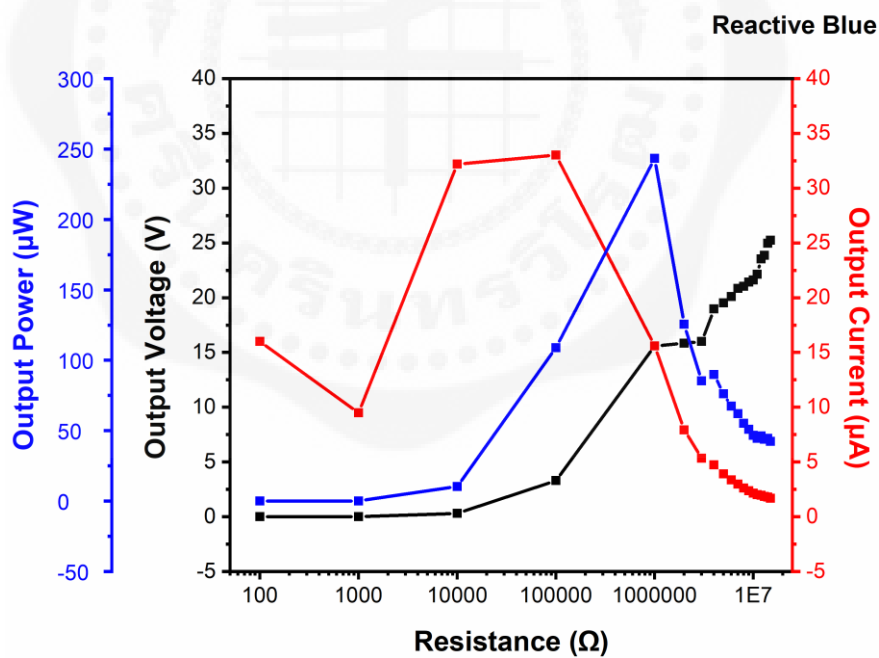
4.7.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ของผ้าคอตตอนและผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟ

จากการตรวจสอบค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes) ภายใต้เงื่อนไขของค่าความต้านทานดังนี้ 100 Ω , 1,000 Ω , 10,000 Ω , 100,000 Ω , 1M Ω , 3M Ω , 5M Ω และ 10M Ω ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าจะมีความมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและค่าการส่งออกจากไฟฟ้า โดยจะพบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของผ้าคอตตอน (Cotton) จะมีค่าสูงที่สุดที่ความต้านทาน 1M Ω โดยจะมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 111.94 μW ดังภาพประกอบที่ 4.29 ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Yingjie และคณะ [41] ที่ทำการศึกษา TENG จากผ้าคอตตอน ที่ใช้ชั้นสัมผัสอีกชั้นเป็นเทฟลอนที่มีรูพรุน (Porous teflon) โดยใช้เทปทองแดง (Cu tape) เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งจากงานวิจัยนี้ แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ $\sim 880 \mu\text{W}$ โดยแสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่มากกว่า TENG ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากลักษณะของชั้นสัมผัส และประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ดีกว่า โดยเทฟลอนที่มีรูพรุนนั้นช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface contact area) เมื่อวัสดุสองชนิดเกิดการเสียดสีหรือสัมผัสกัน การสะสมของประจุที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดขึ้นแค่บริเวณพื้นผิวของวัสดุสัมผัสเท่านั้น แต่เกิดการสะสมประจุในบริเวณรูพรุนภายในโครงสร้างของเทฟลอนด้วย ซึ่งการสะสมประจุที่มาก สามารถช่วยเพิ่มค่าการส่งออกจากไฟฟ้าของ TENG ได้ และการที่ใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นเทปทองแดง ซึ่งเป็นโลหะ (Metal) ที่มีค่า Electrical conductivity $\sim 5 \times 10^7 (1 \cdot (\Omega\text{m}^{-1}))$ ซึ่งสูงกว่า CNT ที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุกึ่งโลหะ (Metalloid) [62] ทำให้ค่าการส่งออกจากไฟฟ้าขาออกของ TENG ที่ใช้ชั้นสัมผัสเป็นเทฟลอนที่ไม่มีรูพรุน และใช้ขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้นจากผ้ากาวชุบด้วย CNT แสดงค่าที่ต่ำกว่า

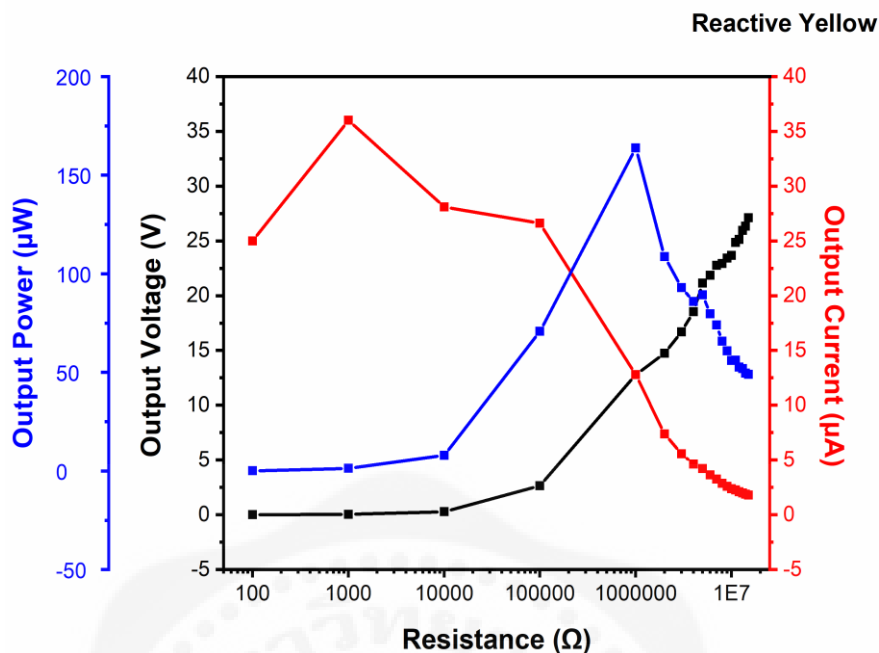
ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟสีน้ำเงิน (Reactive Blue) จะมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงที่สุดที่ความต้านทาน 1M Ω โดยจะมีค่าเท่ากับ 243.36 μW ดังภาพประกอบที่ 4.30 และผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟสีเหลือง (Reactive Yellow) จะมีค่าสูงที่สุดที่ความต้านทาน 1M Ω โดยจะมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 163.84 μW ดังภาพประกอบที่ 4.31 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของผ้าคอตตอนและผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟสีน้ำเงินและสีเหลือง มีแนวโน้มตามค่าการส่งออกจากไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกนั้น มีความสัมพันธ์ที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) คือ $V=IR$



ภาพประกอบที่ 4.29 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ของผ้าคอตตอน



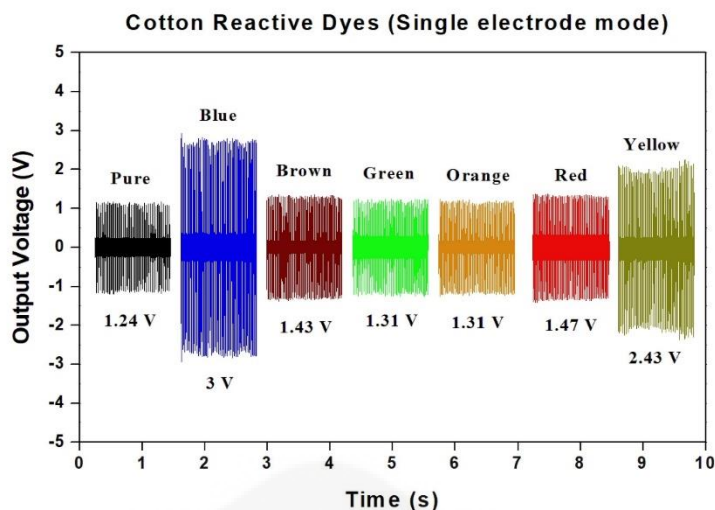
ภาพประกอบที่ 4.30 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ของผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสียรีแอคทีฟสีน้ำเงิน



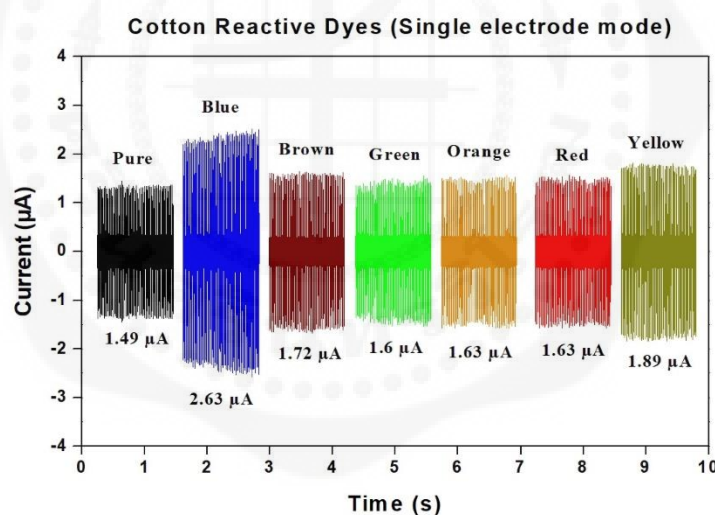
ภาพประกอบที่ 4.31 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ของผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟสีเหลือง

4.7.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี แบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode)

การศึกษาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) แบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode) เนื่องจากการประดิษฐ์ Application สำหรับใช้งานในสิ่งทอนั้นมีข้อจำกัด โดยต้องใช้ในการสัมผัสจากนิ้วมือ ดังนั้นจึงต้องสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน หรือ TENG เพื่อทำการทดสอบเพิ่มอีกในรูปแบบ Single electrode mode โดยนำผ้าคอตตอน (Cotton) และผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes) ไปรีดติดกับขั้วไฟฟ้าแล้วต่อขั้วที่ด้านล่าง โดยทำการทดสอบด้วยการใช้นิ้วมือในการสัมผัสไปที่ชิ้นงาน



ภาพประกอบที่ 4.32 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง แบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode)



ภาพประกอบที่ 4.33 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของผ้าคอตตอน และผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน, สีนํ้าตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง แบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode)

จากภาพประกอบที่ 4.32 และ 4.33 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) โดยผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี แสดงค่าสูงสุดที่ 1.24 V และ 1.49 μA ตามลำดับ ส่วนผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีด้วยสีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes) ทั้งหมด 6 สี

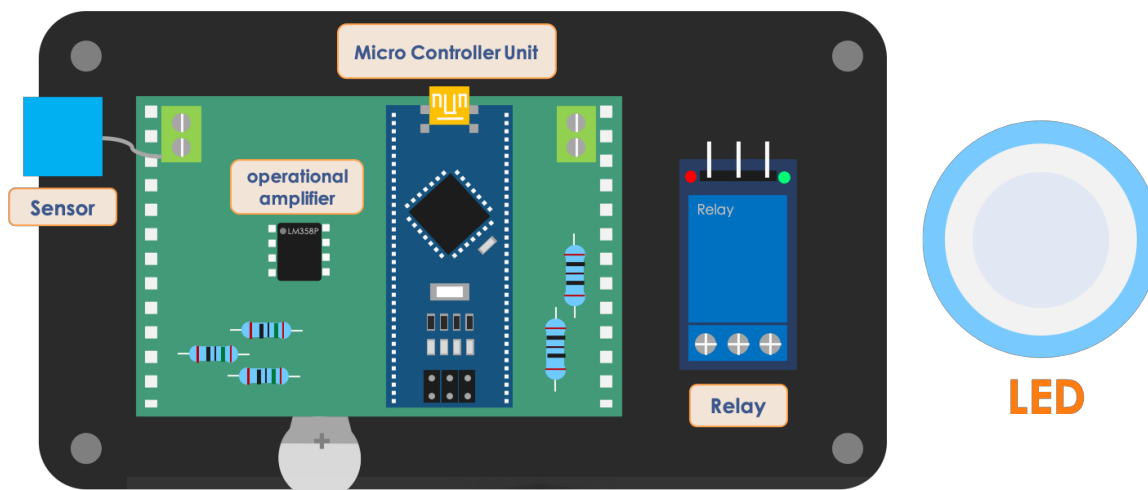
ได้แก่ สีน้ำเงิน, สีน้ำตาล, สีเขียว, สีส้ม, สีแดง และสีเหลือง แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 3 V, 1.43 V, 1.31 V, 1.31 V, 1.47 V และ 2.43 V ตามลำดับ และแสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 2.63 μA , 1.72 μA , 1.6 μA , 1.63 μA , 1.63 μA และ 1.89 μA ตามลำดับ ซึ่งผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีน้ำเงิน (Reactive Blue) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่มากที่สุด คือ 32.7 V และ 36.6 nA ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่วัดโดยรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Contact-separation mode) ก่อนหน้านั้นในหัวข้อ 4.7.3

4.8 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์จากผ้าคอตตอน

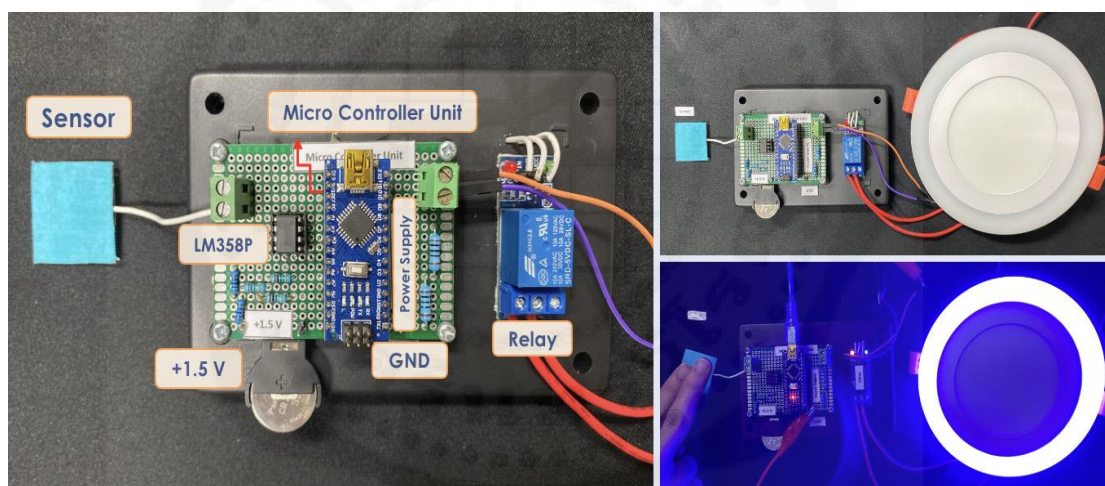
4.8.1 การประดิษฐ์เซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์จากผ้าคอตตอน

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของผ้าคอตตอนและผ้าคอตตอนที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ ที่วัดโดยรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode) และรูปแบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode) ดังแสดงใน 4.7.3, 4.7.6 และผลการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ดังแสดงใน 4.7.5 สามารถสรุปได้ว่า ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีน้ำเงิน มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การทำเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะต้องมีการต่อวงจร ซึ่งภายในแผงวงจรที่งานวิจัยนี้ได้ออกแบบ จะประกอบไปด้วยเซนเซอร์ นั่นคือ อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์จากผ้าคอตตอน นอกจากนี้แล้ว จะมีออปแอมป์ (Operational Amplifier; Op-Amp) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแรงดัน สามารถนำมาใช้แปลงหรือขยายสัญญาณที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller; MCU) ซึ่งเป็นชิปประมวลผลชนิดหนึ่งที่จะช่วยให้นักออกแบบต่อเซนเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันได้ ในงานวิจัยนี้ MCU จะประมวลผลสัญญาณที่ได้จาก Op-Amp เพื่อส่งการไปยังโมดูลรีเลย์ไฟฟ้า (Relay Module) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในวงจรควบคุมอัตโนมัติ ทำหน้าที่เปรียบเสมือนสวิตช์ไฟ ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าในการเปิด และปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมวงจรต่างๆ และ LED ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่งานวิจัยนี้นำมาทดสอบการใช้งานเซนเซอร์ในการเปิดปิด ดังภาพประกอบที่ 4.34 และเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่งานวิจัยนี้สามารถประดิษฐ์ได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.35 โดยมีกลไกการทำงาน คือ เมื่อทำการแตะหนึ่งครั้งด้วยนิ้วมือที่บริเวณ Cotton-based TENG จะเป็นการเปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็น LED และเมื่อทำการแตะด้วยนิ้วมืออีกหนึ่งครั้ง จะเป็นการปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็น LED



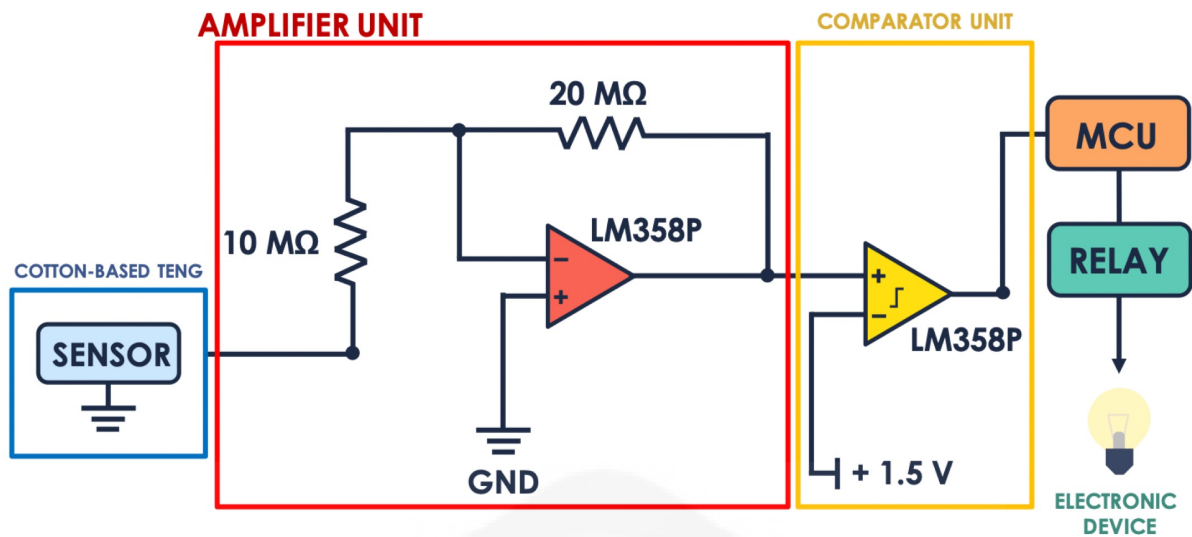
ภาพประกอบที่ 4.34 อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการต่อวงจรเพื่อทำเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



ภาพประกอบที่ 4.35 เซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

4.8.2 แผนภาพวงจรที่ใช้ในการทำเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากภาพประกอบที่ 4.36 จะแสดงให้เห็นระบบของวงจรที่งานวิจัยนี้ใช้ สำหรับใช้ในการทำเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนของเซนเซอร์ คือ อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์จากผ้าคอตตอน Amplifier unit คือส่วนที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณ เพื่อส่งไปให้ส่วนสุดท้าย คือ Comparator unit ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้เปรียบเทียบสัญญาณที่ได้มา และประมวลผลสัญญาณออกไปในรูปแบบดิจิทัลแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (42)



ภาพประกอบที่ 4.36 แผนภาพระบบวงจรที่ใช้ทำเซนเซอร์สำหรับเปิดปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการย้อมสีผ้าคอตตอน ด้วยสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes), สีไดเรกต์ (Direct dyes) และสีเบสิก (Basic dyes) ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีหมู่ฟังก์ชันหลัก คือ หมู่เอมีน (Amine) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี มาย้อมผ้าคอตตอน เพื่อเป็นการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันของผ้าคอตตอน และนำไปศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะของผ้าคอตตอน ก่อน และหลังการย้อมสี โดยการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy) และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) และนำไปใช้เป็นวัสดุเพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) และศึกษาผลของสีย้อมที่ส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริก และค่าการส่งออกจากไฟฟ้า คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power)

5.1.1 ผลการศึกษาวิธีการย้อมสีผ้าคอตตอน ด้วยสีย้อม 3 ชนิด

ในงานวิจัยนี้ ประสบความสำเร็จในการย้อมสีผ้าคอตตอนด้วยสีย้อม 3 ชนิด โดยเริ่มจากการเตรียมผ้าคอตตอนด้วยการชั่งน้ำหนักผ้า และทำการลอกแป้ง ตามด้วยการทำความสะอาดผ้า และทำการย้อมผ้า โดยใช้สีย้อมชนิดสีรีแอคทีฟ จำนวน 6 สี ได้แก่ สีแดง สีนํ้าเงิน สีเหลือง สีส้ม สีนํ้าตาล และสีเหลือง สีย้อมไดเรกต์ จำนวน 5 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน สีเขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง และสีย้อมชนิดเบสิก จำนวน 1 สี ได้แก่ สีแดง

5.1.2 ผลการศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะของผ้าคอตตอนก่อน และหลังการย้อมสี

1. จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผ้าคอตตอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นถึงความเป็นเส้นใยยาว เรียงตัวซ้อนกันอย่างหนาแน่น โดยมีลักษณะของการถักทอ และความเป็นรูพรุนของผ้าคอตตอน

2. จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผ้าคอตตอน ก่อนและหลังการย้อมสี ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $4000-700\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งผ้าคอตตอนก่อนการย้อมสีตรวจพบพิกการดูดกลืนที่ 3335 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H (Hydroxyl group) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของผ้าคอตตอน ที่สอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของผ้าคอตตอน

เช่นเดียวกันกับผ้าคอตตอนหลังการย้อมสี ตรวจพบพิกที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของผ้าคอตตอนก่อนการย้อมสี แต่ยังไม่ปรากฏพิกของสีย้อมออกมาชัดเจน แต่เมื่อทำการขยายพิกไปพิจารณาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1800-1500 cm^{-1} จะพบการเลื่อน (Shift) ของพิกไปทางด้านซ้าย ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าผ้าคอตตอนย้อมสีติดจริง แต่ด้วยปริมาณสีย้อมที่ใช้นั้นมีปริมาณน้อยเกินไป พิกของสีย้อมจึงแสดงออกมาไม่ชัดเจน และถูกพิกของผ้าคอตตอนกลบอยู่

5.1.3 ผลการศึกษาและประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG) โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของขั้วไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ Cotton-based TENG ได้สองโครงสร้าง โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของขั้วไฟฟ้า คือ โครงสร้างที่มีรูปแบบการสัมผัสวัสดุแบบตั้งฉาก (Vertical contact separation mode) ที่มีวัสดุคู่สัมผัส คือ ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสี และพอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) หรือ เทฟลอน โดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นผ้ากาวที่เคลือบด้วยท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT) และอีกโครงสร้าง คือ โครงสร้างที่มีรูปแบบการทำงานเป็นแบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว (Single electrode mode) ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้วไฟฟ้าเพียงข้างเดียว จากผ้ากาวที่เคลือบด้วย CNT ที่รีดติดกับผ้าคอตตอนและผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสี โดย Cotton-based TENG ที่มีโครงสร้างแบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียวนี้เอง จะมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

5.1.4 ผลการศึกษาผลของสีย้อมที่ส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริก และค่าการส่งออกทางไฟฟ้า คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกจากผ้าคอตตอน (Cotton-based TENG)

จากการศึกษาผลของสีย้อมที่ส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริก และค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ พบว่า ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมสีด้วยสีรีแอคทีฟ สีไคเรกท์ และสีเบสิก มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 2.7-4.6 โดยที่ผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 1.75-1.90 ในส่วนของค่าการส่งออกทางไฟฟ้า พบว่า ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีน้ำเงิน นั้นแสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่ 32.7 V, 36.6 nA และ 243 μW ตามลำดับ โดยให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่สูงกว่าผ้าคอตตอนที่ไม่ผ่านการย้อมสี 2.2 เท่า เนื่องจากภายในโครงสร้างของสีย้อมรีแอคทีฟสีน้ำเงิน (Reactive Blue) นั้น เป็นสีเดียวที่มีอะตอมของทองแดง (Copper; Cu) ที่มีค่า EN ต่ำอยู่ในโครงสร้าง ทำให้มีประจุเป็นบวก ซึ่งจากปรากฏการณ์ Inductive Effect ทำให้ที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี ส่งผล

ให้อยู่ในฝั่งที่มีความเป็นบวก [52] ดังนั้น ผ้าคอตตอนที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีน้ำเงินจึงถูกปรับปรุงให้มีความเป็นบวกสูงขึ้น เมื่อสัมผัสกับเทฟลอน (Teflon) ที่มีความเป็นลบสูง ทำให้เกิดความต่างระหว่างความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนของชั้นสัมผัสทั้งสองที่สูงขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า หมู่ฟังก์ชันของสีย้อมนั้นส่งผล และมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของผ้าคอตตอน

5.1.5 ผลการศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้ (Application)

ในงานวิจัยนี้ สามารถนำ Cotton-based TENG ไปประยุกต์ใช้ โดยประดิษฐ์เป็น เซนเซอร์สำหรับเปิด และปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่ง Cotton-based TENG ที่นำมาใช้จะมีโครงสร้างแบบขั้วไฟฟ้าด้านเดียว เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งาน และสามารถออกแบบได้ง่าย โดยภายในวงจรของ Application นี้ จะประกอบไปด้วย เซนเซอร์ (Sensor) ซึ่งคือ Cotton-based TENG ออปแอมป์ (Operational amplifier; Op-Amp) ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ และขยายสัญญาณให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit; MCU) ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณ และส่งต่อไปที่ โมดูลรีเลย์ไฟฟ้า (Relay module) ที่มีหน้าที่เปรียบเสมือนสวิตช์ไฟ ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าในการเปิด และปิด อุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อควบคุมวงจรต่างๆ โดยระบบการต่อแผงวงจร แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนของ เซนเซอร์ (Sensor unit) แอมพลิฟายเออร์ (Amplifier unit) ที่เป็นส่วนของการขยายสัญญาณ และคอมพารเตอร์ (Comparator unit) ซึ่งเป็นส่วนของการเปรียบเทียบสัญญาณ และประมวลผลสัญญาณออกไปในรูปแบบดิจิทัลแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเมื่อแผงวงจรเสร็จสมบูรณ์ เซนเซอร์สำหรับเปิด ปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้ จะมีกลไกการทำงาน คือ เมื่อทำการแตะหนึ่งครั้งด้วยนิ้วมือที่บริเวณ Cotton-based TENG จะเป็นการเปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็น LED และเมื่อทำการแตะด้วยนิ้วมืออีกครั้ง จะเป็นการปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็น LED

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถพัฒนาต่อยอด เพื่อให้สามารถนำไปรวมเข้ากับ เสื้อผ้า หรือสิ่งทอได้อย่างเข้ากันได้ดี โดยการลดขนาดของแผงวงจรให้มีขนาดเล็กลง และปรับเปลี่ยนระบบให้เป็นระบบไร้สาย (Wireless communication) เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งาน และการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Perwej DY, Aboughaly M, Kerim B, Harb H. An Extended Review on Internet of Things (IoT) and Its Promising Applications. 2019;Volume 7:Page 8-22.
2. Zhang Y, Wang H, Lu H, Li S, Zhang Y. Electronic fibers and textiles: Recent progress and perspective. iScience. 2021;24(7):102716.
3. Satharasinghe A, Hughes-Riley T, Dias T. A Review of Solar Energy Harvesting Electronic Textiles. Sensors. 2020;20:5938.
4. Ye G, Soga K. Energy Harvesting from Water Distribution Systems. Journal of Energy Engineering. 2012;138:7-17.
5. Tao JX, Viet NV, Carpinteri A, Wang Q. Energy harvesting from wind by a piezoelectric harvester. Engineering Structures. 2017;133:74-80.
6. Fan F-R, Tian Z-Q, Lin Wang Z. Flexible triboelectric generator. Nano Energy. 2012;1(2):328-34.
7. He C, Wang Z. Triboelectric nanogenerator as a new technology for effective PM 2.5 removing with zero ozone emission. Progress in Natural Science: Materials International. 2018;28.
8. Jeong J, Kwon J-H, Lim K, Biswas S, Tibaldi A, Lee S, et al. Comparative Study of Triboelectric Nanogenerators with Differently Woven Cotton Textiles for Wearable Electronics. Polymers. 2019;11(9).

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

9. Boonchai N MW, Harnchana V, Faungnawakij K, Pinitsoontorn S. Chemical Functionalization of Bacterial Cellulose Film for Enhancing Output Performance of Bio- Triboelectric Nanogenerator. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2022;12(2):1587-600.
10. Nie S, Cai C, Lin X, Zhang C, Lu Y, Mo J, et al. Chemically Functionalized Cellulose Nanofibrils for Improving Triboelectric Charge Density of a Triboelectric Nanogenerator. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020;8(50):18678-85.
11. Roy S, Ko H-U, Maji PK, Van Hai L, Kim J. Large amplification of triboelectric property by allicin to develop high performance cellulosic triboelectric nanogenerator. *Chemical Engineering Journal*. 2020;385:123723.
12. Nie S, Fu Q, Zhang C, Lu Y, Wang S. Enhanced performance of a cellulose nanofibrils-based triboelectric nanogenerator by tuning the surface polarizability and hydrophobicity. *Chemical Engineering Journal*. 2021;404:126512.
13. Yao C, Yin X, Yu Y, Cai Z, Wang X. Chemically Functionalized Natural Cellulose Materials for Effective Triboelectric Nanogenerator Development. *Advanced Functional Materials*. 2017;27:1700794.
14. Ometov A, Shubina V, Klus L, Skibińska J, Saafi S, Pascacio P, et al. A Survey on Wearable Technology: History, State-of-the-Art and Current Challenges. *Computer Networks*. 2021;193:108074.
15. Guk K, Han G, Lim J, Jeong K, Kang T, Lim E-K, et al. Evolution of Wearable Devices with Real-Time Disease Monitoring for Personalized Healthcare. *Nanomaterials*. 2019;9(6).

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

16. Wu C, Wang A, Ding W, Guo H, Wang Z. Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era. *Advanced Energy Materials*. 2018;9:1802906.
17. Wang Y, Yang Y, Wang ZL. Triboelectric nanogenerators as flexible power sources. *npj Flexible Electronics*. 2017;1(1):10.
18. Li S, Wang J, Peng W, Lin L, Zi Y, Wang S, et al. Sustainable Energy Source for Wearable Electronics Based on Multilayer Elastomeric Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Energy Materials*. 2017;7:1602832.
19. Koszewska M. Circular Economy Challenges for the Textile and Clothing Industry. *Autex Research Journal*. 2018;18(4):337-47.
20. Cezan SD, Nalbant AA, Buyuktemiz M, Dede Y, Baytekin HT, Baytekin B. Control of triboelectric charges on common polymers by photoexcitation of organic dyes. *Nature Communications*. 2019;10(1):276.
21. Kou H, Liu Z, Zhu B, Macharia D, Ahmed S, Wu B, et al. Recyclable CNT-coupled cotton fabrics for low-cost and efficient desalination of seawater under sunlight. *Desalination*. 2019;462:29-38.
22. Costa RS, Guedes A, Pereira AM, Pereira C. Fabrication of all-solid-state textile supercapacitors based on industrial-grade multi-walled carbon nanotubes for enhanced energy storage. *Journal of Materials Science*. 2020;55(23):10121-41.
23. Portella E, Romanzini D, Angrizani C, Amico S, Zattera A. Influence of Stacking Sequence on the Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Cotton/Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *Materials Research*. 2016;19.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

24. Dindorkar SS, Yadav A. Insights from Density Functional Theory on the Feasibility of Modified Reactive Dyes as Dye Sensitizers in Dye- Sensitized Solar Cell Applications. *Solar*. 2022;2(1).
25. Holkar C. DIFFERENT STROKES FOR DECOLORISATION OF TEXTILE WASTEWATER 2014.
26. Das A, Mishra S. Removal of textile dye reactive green- 19 using bacterial consortium: Process optimization using response surface methodology and kinetics study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017;5(1):612-27.
27. Werede E, Jabasingh SA, Demsash HD, Jaya N, Gebrehiwot G. Eco-friendly cotton fabric dyeing using a green, sustainable natural dye from Gunda Gundo (*Citrus sinensis*) orange peels. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021.
28. Zubair N, Abdullahi A, Adeniyi D. CO- METABOLIC BIODEGRADATION AND DETOXIFICATION OF REACTIVE ORANGE DYE BY LACCASE- PRODUCING PLEUROTUS PULMONARIUS KP826832. 2018;3.
29. Pérez-Calderón J, Santos MV, Zaritzky N. Reactive RED 195 dye removal using chitosan coacervated particles as bio-sorbent: Analysis of kinetics, equilibrium and adsorption mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018;6(5):6749-60.
30. Patil NN, Shukla SR. Degradation of Reactive Yellow 145 dye by persulfate using microwave and conventional heating. *Journal of Water Process Engineering*. 2015;7:314-27.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

31. Kiran S, Rafique MA, Iqbal S, Nosheen S, Naz S, Rasheed A. Synthesis of nickel nanoparticles using Citrullus colocynthis stem extract for remediation of Reactive Yellow 160 dye. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(26):32998-3007.
32. Lozano-Alvarez J, Marañón V, Jauregui-Rincón J, Medina Ramirez I, Frausto-Reyes C, Salinas Gutiérrez R. Removal of Direct Dyes with Alginic Acid. *Journal of the Mexican Chemical Society*. 2015;59:215-28.
33. Bello OS. Adsorptive removal of malachite green with activated carbon prepared from oil palm fruit fibre by KOH activation and CO₂ gasification. *South African Journal of Chemistry*. 2013;66:00-.
34. Singh S, Chatterji S, Nandini PT, Prasad ASA, Rao KVB. Biodegradation of azo dye Direct Orange 16 by *Micrococcus luteus* strain SSN2. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015;12(7):2161-8.
35. Bartošová A, Blinová L, Sirotiak M, Michalíková A. Usage of FTIR-ATR as Non-Destructive Analysis of Selected Toxic Dyes. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*. 2017;25(40):103-11.
36. Módenes A, Scheufele F, Espinoza-Quiñones F, Souza P, Cripa C, Santos J, et al. Adsorption of Direct of Yellow ARLE Dye by Activated Carbon of Shell of Coconut Palm: Diffusional Effects on Kinetics and Equilibrium States. *International Journal Bioautomation*. 2015;19:187-206.
37. He F-N, Li X, Zhu M-K, Hu J-H, Yuan Y-J, Li C-C, et al. Color stripping of reactive-dyed cotton fabric in a UV/sodium hydrosulfite system with a dipping manner at low temperature. *Cellulose*. 2019;26.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

38. Yamada Y, Suh M. Relationships between Structure and Microwave Dielectric Properties in Cotton Fabrics. *Materials Research Express*. 2020;7:1-12.
39. Marinho B, Ghislandi M, Tkalya E, Koning CE, de With G. Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder. *Powder Technology*. 2012;221:351-8.
40. Kinloch Ian A, Suhr J, Lou J, Young Robert J, Ajayan Pulickel M. Composites with carbon nanotubes and graphene: An outlook. *Science*. 2018;362(6414):547-53.
41. Tang Y, Zhou H, Sun X, Feng T, Zhao X, Wang Z, et al. Cotton-based naturally wearable power source for self-powered personal electronics. *Journal of Materials Science*. 2020;55(6):2462-70.
42. Charoonsuk T, Muanghlua R, Sriphan S, Pongampai S, Vittayakorn N. Utilization of commodity thermoplastic polyethylene (PE) by enhanced sensing performance with liquid phase electrolyte for a flexible and transparent triboelectric tactile sensor. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021;27:e00239.
43. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: [ม.ป.พ.]; 2563 [เข้าถึงเมื่อ 1 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.egat.co.th/home/renewables/>
44. วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี [อินเทอร์เน็ต]. [ม.ป.ท.]: [ม.ป.พ.]; 2564 [เข้าถึงเมื่อ 1 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%81%E0%B8%AD%E0%B8%AE%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B9%8C>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

45. Course Hero [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2021 [cited 2021 Dec 1]. Available from: <https://courses.lumenlearning.com/boundless-chemistry/chapter/functional-group-names-properties-and-reactions/>
46. วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี [อินเทอร์เน็ต]. [ม.ป.ท.]: [ม.ป.พ.]; 2562 [เข้าถึงเมื่อ 2 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%94%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%8B%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%81>
47. Priti Veja. WEFT LAB [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2015 [cited 2021 Dec 5]. Available from: <http://weft-lab.blogspot.com/2015/09/integrated-woven-electronic-textiles-e.html>
48. World dye variety [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2012 [cited 2021 Dec 5]. Available from: <http://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-red-1.html>
49. World dye variety [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2012 [cited 2021 Dec 6]. Available from: <http://www.worlddyevariety.com/direct-dyes/direct-red-31.html>
50. World dye variety [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2013 [cited 2021 Dec 6]. Available from: <http://www.worlddyevariety.com/basic-dyes/basic-brown-1.html>
51. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [ม.ป.พ.]; 2563 [เข้าถึงเมื่อ 10 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.strec.chula.ac.th/base/equipments-rates/scanning-electron-microscope-and-energy-dispersive-x-ray-spectrometer-sem-eds-it500hr>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

52. สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) [อินเทอร์เน็ต]. นครราชสีมา: [ม.ป.พ.]; 2563 [เข้าถึงเมื่อ 10 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-%E0%B8%9A%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%97%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%A8%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B9%8C/66-ftir-micro-spectrometer.html>
53. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี [อินเทอร์เน็ต]. นครราชสีมา: [ม.ป.พ.]; 2557 [เข้าถึงเมื่อ 10 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <http://cste.sut.ac.th/2014/?p=945>
54. XTM beamline [Internet]. Nakhon Ratchasima: [publisher unknown]; 2021 [cited 2021 Dec 10]. Available from: <https://xtmbeamline.wixsite.com/home>
55. บริษัท เอสซีเอ็ม อลิอันซ์ จำกัด [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [ม.ป.พ.]; 2563 [เข้าถึงเมื่อ 10 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.scmashopping.com/product/586/gw-instek-%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%AA%E0%B8%8B%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AA%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%9B-%E0%B8%A3%E0%B8%B8%E0%B9%88%E0%B8%99-gds-2074a>
56. มหาวิทยาลัยแม่โจ้ [อินเทอร์เน็ต]. เชียงใหม่: [ม.ป.พ.]; 2563. การใช้งานเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า; 2563 [เข้าถึงเมื่อ 10 ธ.ค. 2563]; [น. 1-11]. เข้าถึงได้จาก: <https://erp.mju.ac.th/openFile.aspx?id=NDA3MDU3&method=inline>
57. Elishop.EU [Internet]. Eindhoven: [publisher unknown]; 2021 [cited 2021 Dec 10]. Available from: <https://elishop.eu/sourcetronic-st2827c-precision-lcr-meter.html>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

58. James Ashenhurst. Master Organic Chemistry [Internet]. Nashville TN: [publisher unknown]; 2020 [cited 2021 Dec 16]. Available from: <https://www.masterorganicchemistry.com/2017/09/26/activating-and-deactivating-groups-in-electrophilic-aromatic-substitution/>
59. บริษัท เทคโนโลยี เทสต์ ซิสเต็ม จำกัด [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [ม.ป.พ.]; 2563 [เข้าถึงเมื่อ 16 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.technotestsystem.com/14922206/มัลติมิเตอร์แบบตั้งโต๊ะ>
60. Alibaba [อินเทอร์เน็ต]. [ม.ป.ท.]: [ม.ป.พ.]; 2563 [เข้าถึงเมื่อ 16 ธ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <https://thai.alibaba.com/product-detail/analog-multimeter-analog-meter-multimeter-voltage-meter-current-meter-yx360-tester-yx360tres-without-battery-60404391097.html>
61. Sparkfun [Internet]. Colorado: [publisher unknown]; 2021 [cited 2021 Dec 16]. Available from: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-use-a-multimeter/what-makes-a-good-multimeter>
62. Chegg [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 May 26]. Available from: <https://www.chegg.com/homework-help/electrical-conductivity-copper-given-table-226-electron-mobi-chapter-22-problem-25p-solution-9781133715078-exc>
63. Wikimedia [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2021 [cited 2022 May 26]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reactive_Blue_21.svg

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

64. ChemSrc [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 May 26]. Available from: https://www.chemsrc.com/en/cas/12225-73-9_1545651.html
65. ChemSrc [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 May 26]. Available from: https://www.chemsrc.com/en/cas/61931-49-5_932007.html
66. Hindawi [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 May 26]. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/540975/fig5/>
67. MZ Nawahwi. Researchgate [Internet]. Kuala Pilah: Bioremediation & Biodegradation; 2012 [cited 2022 May 26]. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-CI-Reactive-Red-195-used-in-this-biodegradation-experiments-18_fig4_270196447
68. World dye variety [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2012 [cited 2022 May 26]. Available from: <http://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-yellow-167.html>
69. Chemical Book [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 May 26]. Available from: https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB01453522.html
70. World dye variety [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2012 [cited 2022 May 26]. Available from: <http://www.worlddyevariety.com/direct-dyes/direct-green-6.html>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

71. Chemical Book [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 May 26]. Available from: https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB5855108.html
72. World dye variety [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2012 [cited 2022 May 26]. Available from: <http://www.worlddyevariety.com/direct-dyes/direct-red-243.html>
73. Chemical Book [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 May 26]. Available from: https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB3875357.html
74. World dye variety [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2012 [cited 2022 May 26]. Available from: <http://www.worlddyevariety.com/basic-dyes/basic-red-9.html>



ภาคผนวก

ภาคผนวก

1. การเตรียมผ้าคอตตอนก่อนการย้อมสี โดยมีน้ำหนักผ้าคอตตอนที่ 35.2 กรัม

1.1 วิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ในการลอกแป้ง เมื่อกำหนดให้ $L : R = 1 : 20$

เทียบบัญญัติไตรยางค์:

$L:R = 1:20$ หมายถึง ผ้าคอตตอน 1 กรัม ใช้น้ำในการลอกแป้ง 20 มิลลิลิตร

$$\text{ผ้าคอตตอน 35.2 กรัม ใช้น้ำในการลอกแป้ง } \frac{20 \times 35.2}{1} = 704 \text{ มิลลิลิตร}$$

∴ ผ้าคอตตอน 35.2 กรัม ใช้น้ำในการลอกแป้ง 704 มิลลิลิตร

1.2 วิธีการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการลอกแป้ง ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride; NaCl), แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride; CaCl) และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

โดยมี NaCl 10 กรัม/ลิตร, CaCl 0.5 กรัม/ลิตร และ Nonionic surfactant 1 กรัม/ลิตร

เทียบบัญญัติไตรยางค์:

NaCl 10 กรัม/ลิตร: น้ำ 1000 มิลลิลิตร ใช้ NaCl 10 กรัม

$$\text{น้ำ 704 มิลลิลิตร ใช้ NaCl } \frac{10 \times 704}{1000} = 7.04 \text{ กรัม}$$

CaCl 0.5 กรัม/ลิตร: น้ำ 1000 มิลลิลิตร ใช้ CaCl 0.5 กรัม

$$\text{น้ำ 704 มิลลิลิตร ใช้ CaCl } \frac{0.5 \times 704}{1000} = 0.352 \text{ กรัม}$$

Nonionic surfactant 1 กรัม/ลิตร: น้ำ 1000 มิลลิลิตร ใช้ Nonionic surfactant 1 กรัม

$$\text{น้ำ 704 มิลลิลิตร ใช้ Nonionic surfactant } \frac{1 \times 704}{1000} = 0.704 \text{ กรัม}$$

∴ ผ้าคอตตอน 35.2 กรัม ใช้ NaCl 7.04 กรัม, CaCl 0.352 กรัม และ Nonionic surfactant 0.704 กรัม ละลายในน้ำ 704 มิลลิลิตร

ภาคผนวก(ต่อ)

1.3 วิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาดผ้า เมื่อกำหนดให้ L : R = 1 : 20

เทียบบัญญัติไตรยางค์:

L:R = 1:20 หมายถึง ผ้าคอตตอน 1 กรัม ใช้น้ำในการทำความสะอาด 20 มิลลิลิตร

$$\text{ผ้าคอตตอน 35.2 กรัม ใช้น้ำในการทำความสะอาด } \frac{20 \times 35.2}{1} = 704 \text{ มิลลิลิตร}$$

∴ ผ้าคอตตอน 35.2 กรัม ใช้น้ำในการลอกแป้ง 704 มิลลิลิตร

1.4 วิธีการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการลอกแป้ง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) 4% และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) 0.2%

เทียบบัญญัติไตรยางค์:

NaOH 4%: ผ้าคอตตอน 100 กรัม ใช้ NaOH 4 กรัม

$$\text{ผ้าคอตตอน 35.2 กรัม NaOH } \frac{4 \times 35.2}{100} = 1.408 \text{ กรัม}$$

Nonionic surfactant 0.2%: ผ้าคอตตอน 100 กรัม ใช้ Nonionic surfactant 0.2 กรัม

$$\text{ผ้าคอตตอน 35.2 กรัม Nonionic surfactant } \frac{0.2 \times 35.2}{100} = 0.0704 \text{ กรัม}$$

∴ ผ้าคอตตอน 35.2 กรัม ใช้ NaOH 1.408 กรัม และ Nonionic surfactant 0.0704 กรัม
ละลายในน้ำ 704 มิลลิลิตร

2. การย้อมสีผ้าคอตตอน โดยมีน้ำหนักผ้าคอตตอนที่ 5 กรัม

2.1 วิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ในการย้อมสี เมื่อกำหนดให้ L : R = 1 : 20

เทียบบัญญัติไตรยางค์:

L:R = 1:20 หมายถึง ผ้าคอตตอน 1 กรัม ใช้น้ำในการย้อมสี 20 มิลลิลิตร

$$\text{ผ้าคอตตอน 5 กรัม ใช้น้ำในการย้อมสี } \frac{20 \times 5}{1} = 100 \text{ มิลลิลิตร}$$

∴ ผ้าคอตตอน 5 กรัม ใช้น้ำในการย้อมสี 100 มิลลิลิตร

ภาคผนวก(ต่อ)

2.2 วิธีคำนวณปริมาณสีย้อม เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้น 2% owf

เทียบบัญญัติไตรยางค์:

สี 2% owf หมายถึง ผ้าย้อม 100 กรัม ใช้สีย้อม 2 กรัม

$$\text{ผ้าย้อม 5 กรัม ใช้สีย้อม } \frac{2 \times 5}{100} = 0.1 \text{ กรัม}$$

∴ ผ้าย้อม 5 กรัม ใช้สีย้อม 0.1 กรัม ละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร

2.3 วิธีคำนวณปริมาณสารช่วยย้อม ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate; Na_2CO_3) โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate; Na_2SO_4) และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant)

โดยมี Na_2CO_3 10 กรัม/ลิตร, Na_2SO_4 20 กรัม/ลิตร และ Anionic surfactant 5 กรัม/ลิตร

เทียบบัญญัติไตรยางค์:

Na_2CO_3 10 กรัม/ลิตร: น้ำ 1000 มิลลิลิตร ใช้ Na_2CO_3 10 กรัม

$$\text{น้ำ 100 มิลลิลิตร ใช้ } \text{Na}_2\text{CO}_3 \frac{10 \times 100}{1000} = 1 \text{ กรัม}$$

Na_2SO_4 20 กรัม/ลิตร: น้ำ 1000 มิลลิลิตร ใช้ Na_2SO_4 20 กรัม

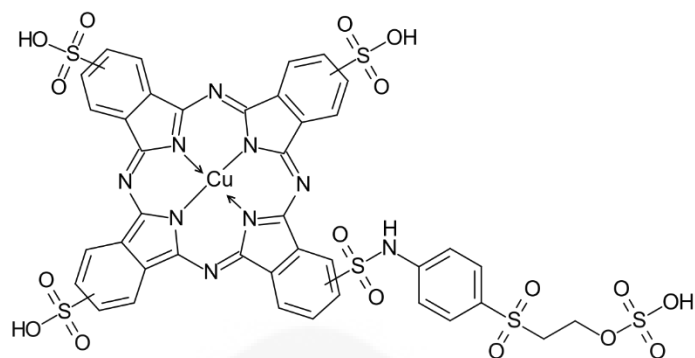
$$\text{น้ำ 100 มิลลิลิตร ใช้ } \text{Na}_2\text{SO}_4 \frac{20 \times 100}{1000} = 2 \text{ กรัม}$$

Anionic surfactant 5 กรัม/ลิตร: น้ำ 1000 มิลลิลิตร ใช้ Anionic surfactant 5 กรัม

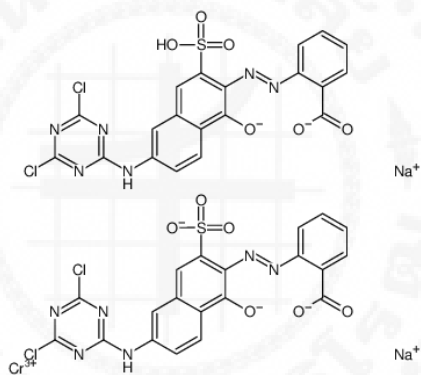
$$\text{น้ำ 100 มิลลิลิตร ใช้ Anionic surfactant } \frac{5 \times 100}{1000} = 0.5 \text{ กรัม}$$

∴ ผ้าย้อม 5 กรัม ใช้ Na_2CO_3 1 กรัม, Na_2SO_4 2 กรัม, และ Anionic surfactant 0.5 กรัม
ละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร

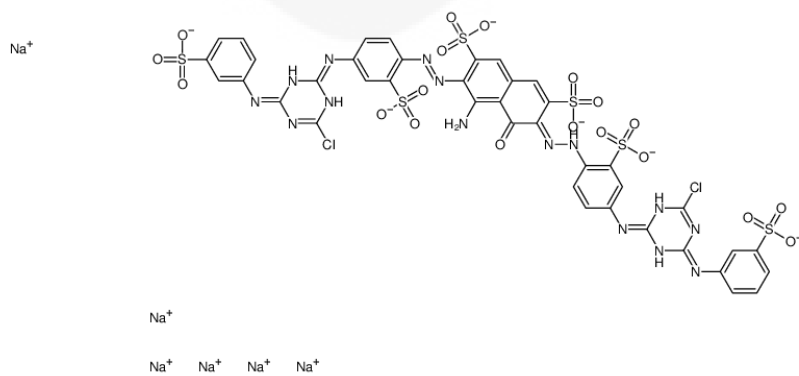
ภาคผนวก(ต่อ)



โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟสีน้ำเงิน [63]

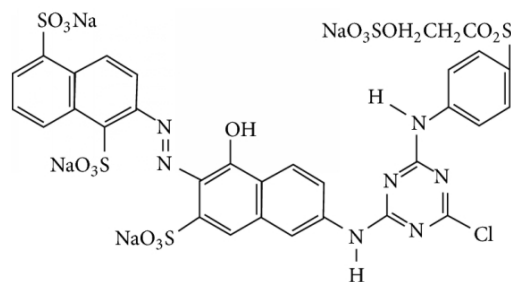


โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟสีน้ำตาล [64]



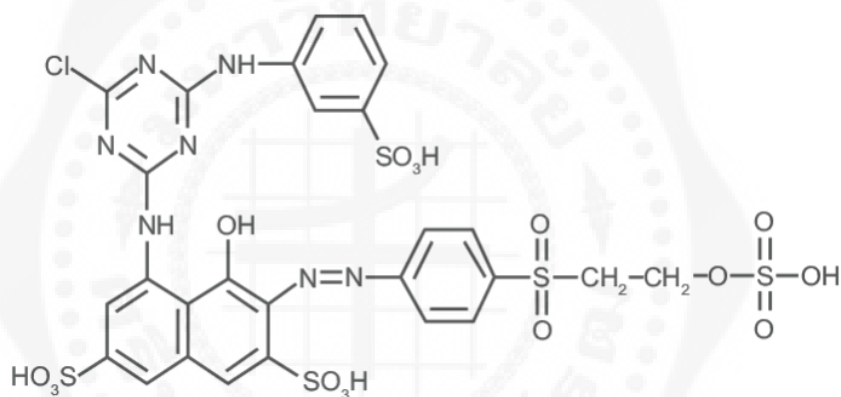
โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟสีเขียว [65]

ภาคผนวก(ต่อ)

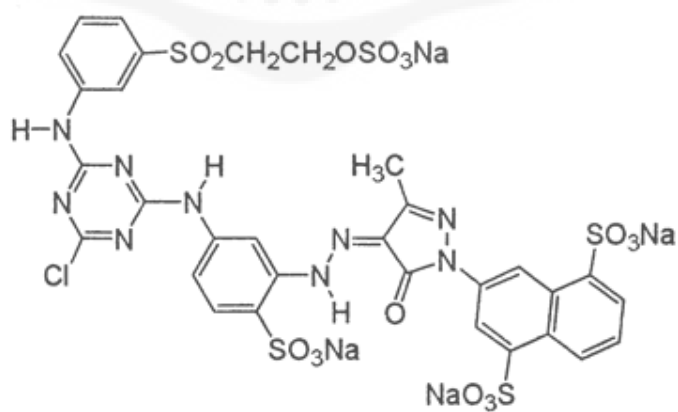


Reactive orange122

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟสีส้ม [66]

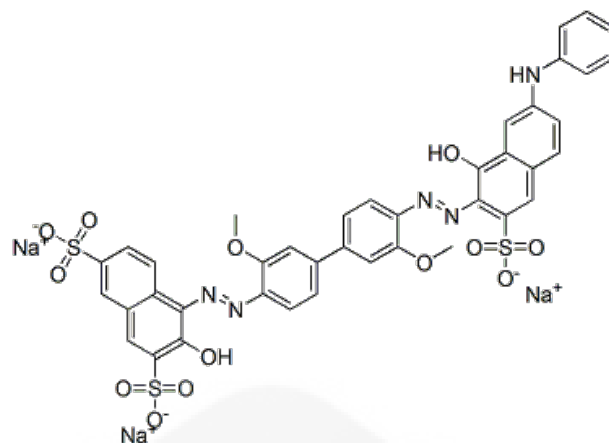


โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟสีแดง [67]

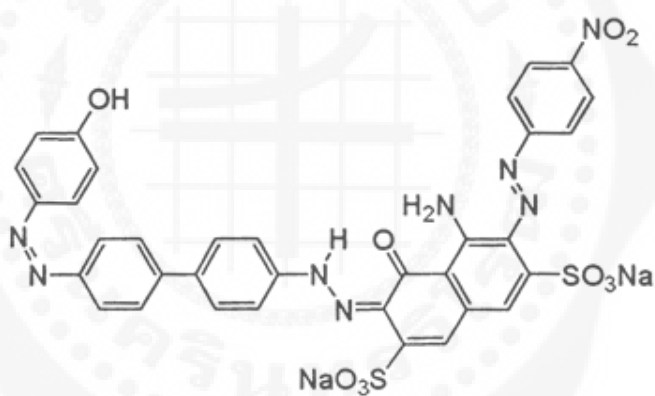


โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟสีเหลือง [68]

ภาคผนวก(ต่อ)

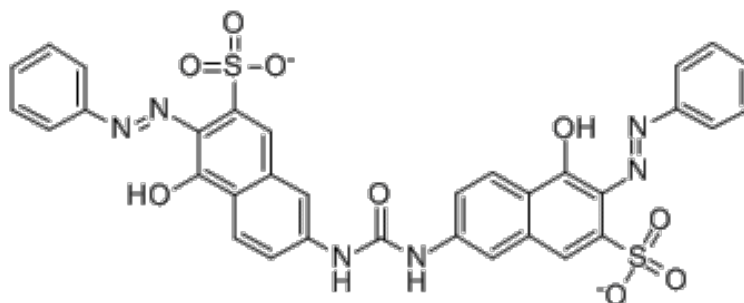


โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไดเรกต์สีน้ำเงิน [69]



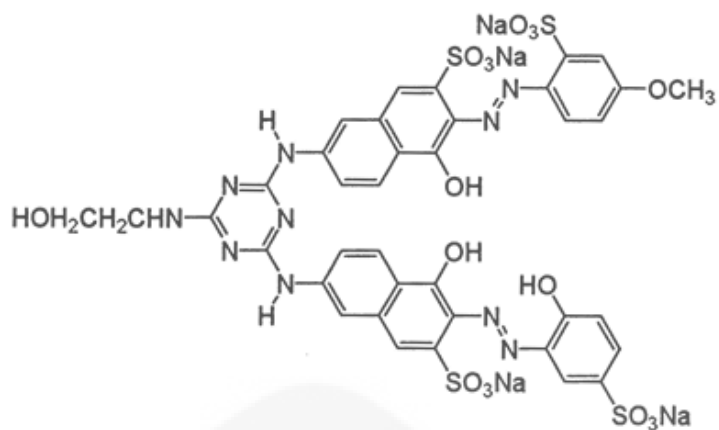
โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไดเรกต์สีเขียว [70]

Na⁺ Na⁺

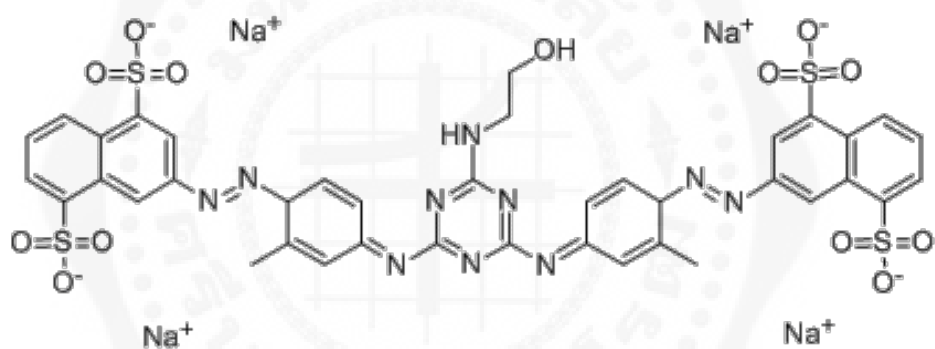


โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไดเรกต์สีส้ม [71]

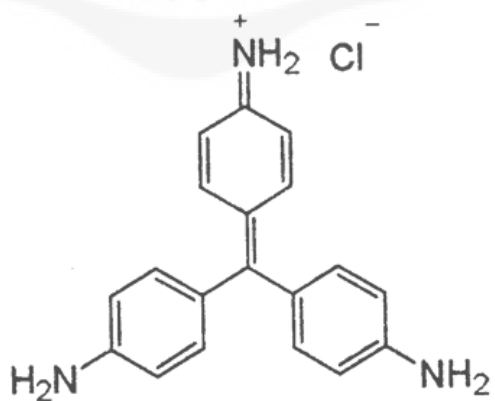
ภาคผนวก(ต่อ)



โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไตรอะทสีแดง [72]



โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไตรอะทสีเหลือง [73]



โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมเบสิดสีแดง [74]

ภาคผนวก(ต่อ)

3. วิธีการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ของผ้าคอตตอนก่อน และหลังการย้อมสี

เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าเข้ากับตัวต้านทาน และวัดหาค่าแรงดันไฟฟ้า โดยค่าความต้านทาน และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ สามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law)

จากสูตร $V=IR$ เมื่อ

V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

R คือ ค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

เมื่อได้ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าแรงดันไฟฟ้า สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าได้

จากสูตร $P=IV$ เมื่อ

P คือ ค่ากำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล สิริพร หวู
วัน เดือน ปี เกิด 18 กรกฎาคม 2543
สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีวัดมหาพฤฒาราม ในพระบรมราชินูปถัมภ์
 จังหวัดกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2560
 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 พ.ศ.2564

ชื่อ-สกุล สุขานาถ นวตระกูลพิสิษฐ์
วัน เดือน ปี เกิด 10 กันยายน 2542
สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเซนต์โยเซฟ บางนา จังหวัดสมุทรปราการ
 พ.ศ.2560
 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 พ.ศ.2564

ชื่อ-สกุล ภูมิกรินทร์ นิลละอ
วัน เดือน ปี เกิด 27 ตุลาคม 2542
สถานที่เกิด ขอนแก่น
วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบ้านไผ่ (ข.ก.๕) จังหวัดขอนแก่น พ.ศ. 2560
 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 พ.ศ.2564