



รายงานฉบับสมบูรณ์

กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

การพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าต้นทุนต่ำ

สำหรับเซ็นเซอร์เชิงผ้าอิเล็กทรอนิกส์

Development of Low-Cost Conductive Ink
for Electronic Fabric Sensor

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ทัพสูงเนิน รัตนจันทร์

สังกัด สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี อูสาหะ สังกัด สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระยะเวลาของโครงการ เมษายน 2563 – มีนาคม 2564

งบประมาณโครงการ 260,000 บาท

ประจำปีงบประมาณ 2563

Abstract

With the emergence of an aging society, the demand for innovative solutions to aid caregivers and medical professionals in elderly care has become crucial, especially in Thailand and many other countries. Sensor and wearable technology, embedded in textiles and fabrics, offer non-invasive and unobtrusive health monitoring solutions. This research focuses on the development of low cost conductive ink for array pressure electronic fabric sensors, which is implemented through screen printing on textiles.³ The resulting electronic fabric pressure sensing system measures distributed pressure, potentially benefiting both independent individuals and those with limited mobility or bedridden patients.

To assess the performance of the pressure sensor, various tests, including repeatability and ink age, are conducted. A graphical user interface using MIT App Inventor is designed for real-time data presentation in the form of a pressure map, illustrating pressure values from distributed points. The developed standalone fabric pressure sensor array offers real-time pressure data, showing promise for integration into fabric pressure distribution monitoring systems. In conclusion, this research establishes a robust framework for measuring pressure distribution and identifying on-off notifications, potentially mitigating the risks associated with falls and health issues in bedridden patients.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ในยุคการเข้าสู่สังคมสูงวัย ความต้องการนวัตกรรมโซลูชันเพื่อช่วยเหลือผู้ดูแลและบุคลากรทางการแพทย์ในการดูแลผู้สูงอายุจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในประเทศไทยและประเทศอื่นๆ เช่น เซอร์และเทคโนโลยีอุปกรณ์สวมใส่ที่ฝังอยู่ในสิ่งทอและผ้า เป็นการเสนอโซลูชันการตรวจติดตามสุขภาพที่ไม่รุกรานที่ให้ความสำคัญเป็นส่วนตัวและไม่เกะกะ งานวิจัยนี้ จึงพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าต้นทุนต่ำสำหรับเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับแบบอาร์เรย์ ซึ่งใช้วิธีการพิมพ์สกรีนบนสิ่งทอ ผลลัพธ์ของระบบเซ็นเซอร์วัดแรงกดจะวัดแรงกดทับบนผ้า ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ต่อทั้งผู้ที่มีสุขภาพดีและผู้ที่มีการเคลื่อนไหวจำกัดหรือผู้ป่วยติดเตียง

ดังนั้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ความดัน งานวิจัยนี้ จึงได้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเซ็นเซอร์ ซึ่งได้แก่ ความสามารถในการนำไฟฟ้า ความสามารถในการทำซ้ำและอายุหมึก นอกจากนี้ ยังได้ออกแบบ อินเทอร์เฟซผู้ใช้แบบกราฟิกโดยใช้ MIT App Inventor เพื่อการนำเสนอข้อมูลแบบเรียลไทม์ในรูปแบบของแผนที่แรงกดทับ ซึ่งแสดงค่าแรงกดทับที่กระจายบนเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้า แบบสแตนด์อโลนที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถแสดงข้อมูลแรงกดแบบเรียลไทม์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการบูรณาการเข้ากับระบบตรวจสอบการกระจายแรงกดทับ โดยสรุป การวิจัยนี้ได้นำเสนอ การพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าต้นทุนต่ำ และประยุกต์ใช้สำหรับการวัดแรงกดทับที่กระจายบนผ้า และการระบุการแจ้งเตือน on-off ซึ่งอาจช่วยลดความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการตกที่นอน การหกล้มและปัญหาสุขภาพในผู้ป่วยที่ติดเตียงได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญรูปภาพ	ฅ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่ นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	1
1.4 ทฤษฎีหรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	4
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย	12
1.6 ขอบเขตของโครงการ	13
1.7 ระยะเวลาที่ทำการวิจัย	13
1.8 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ	14
1.9 อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับโครงการ	15
บทที่ 2 การออกแบบหมึกนำไฟฟ้าเพื่อทดแทนหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในท้องตลาด	
2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง	16
2.2 ขอบเขตของการทดลอง	16
2.3 ข้อชี้แจงในการรายงานความก้าวหน้างานวิจัย	16
2.4 วิธีดำเนินการทดลอง ตอนที่ 1	17
2.4.1 ความหนาชั้นหมึกนำไฟฟ้าที่สกรีนหมึกลงบนผ้าคอตตอน ต่อประสิทธิภาพของค่าความต้านทานไฟฟ้า	17
2.4.2 การศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสาน กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า	18
2.4.3 การศึกษาผลของชนิดตัวเชื่อมประสานที่มีผลต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า	19

2.4.4 การศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด AC_2 ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า	20
2.4.5 วิธีการเตรียมหมึกนำไฟฟ้า	21
2.5 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	22
2.5.1 ผลของความหนาชั้นหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 ที่ได้จากการสกรีนหมึกลงบนคอตต้อนต่อประสิทธิภาพของค่าความต้านทานไฟฟ้า	22
2.5.2 ผลการศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานกลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า	25
2.5.3 ผลของชนิดตัวเชื่อมประสานต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและหมึกนำไฟฟ้าที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย	30
2.5.4 ผลการศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด AC_2 ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า	36
2.6 สรุปผลการทดลองตอนที่ 1	40
2.7 วิธีดำเนินการทดลอง ตอนที่ 2	41
2.7.1 การเตรียม binder ที่ใช้สารพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสารเชื่อมประสาน	41
2.7.2 ศึกษาปริมาณกราฟีน และระยะเวลาในการบ่มหมึกนำไฟฟ้า	42
2.7.3 ศึกษาการเคลือบผ้ากันความชื้น	44
2.8 ผลการศึกษา ตอนที่ 2	46
2.8.1 ผลของสารเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของส่วน ผสมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็น binder	46
2.8.2 ผลของระยะเวลาหลังผ่านการสกรีน	48
2.8.3 ผลการศึกษาปริมาณกราฟีนในหมึกและระยะเวลาในการบ่มหมึกต่อค่า ความต้านทานไฟฟ้า	54
2.8.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของหมึกที่บ่มเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน และผ่านการสกรีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	62
2.8.5 ผลการเคลือบน้ำ	65
2.8.6 ผลการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าของวงจรสกรีน	66

ที่ผ่านการเคลือบสารกันความชื้น

2.9 สรุปผลการทดลองตอนที่ 2 67

บทที่ 3 อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ ด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า

3.1 วัตถุประสงค์ 68

3.2 การประกอบอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ ด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า 69

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้า โดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก 70

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้า 71

โดยใช้ Universal Testing Machine (UTM)

3.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติของอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้าของหมึกนำไฟฟ้า 72

3.5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก 72

3.5.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก 72

ใช้หมึกนำไฟฟ้า สูตรบ่ม 7 วัน

3.5.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก 74

ใช้หมึกนำไฟฟ้า สูตรบ่ม 14 วัน

3.5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ Universal Testing Machine 76

3.5.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ UTM 76

ใช้หมึกนำไฟฟ้า สูตรบ่ม 7 วัน

3.5.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ UTM 81

ใช้หมึกนำไฟฟ้า สูตรบ่ม 14 วัน

3.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง 85

บทที่ 4 สรุป

4.1 การออกแบบหมึกนำไฟฟ้าเพื่อทดแทนหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในท้องตลาด 86

4.2 อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ ด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า 86

บรรณานุกรม

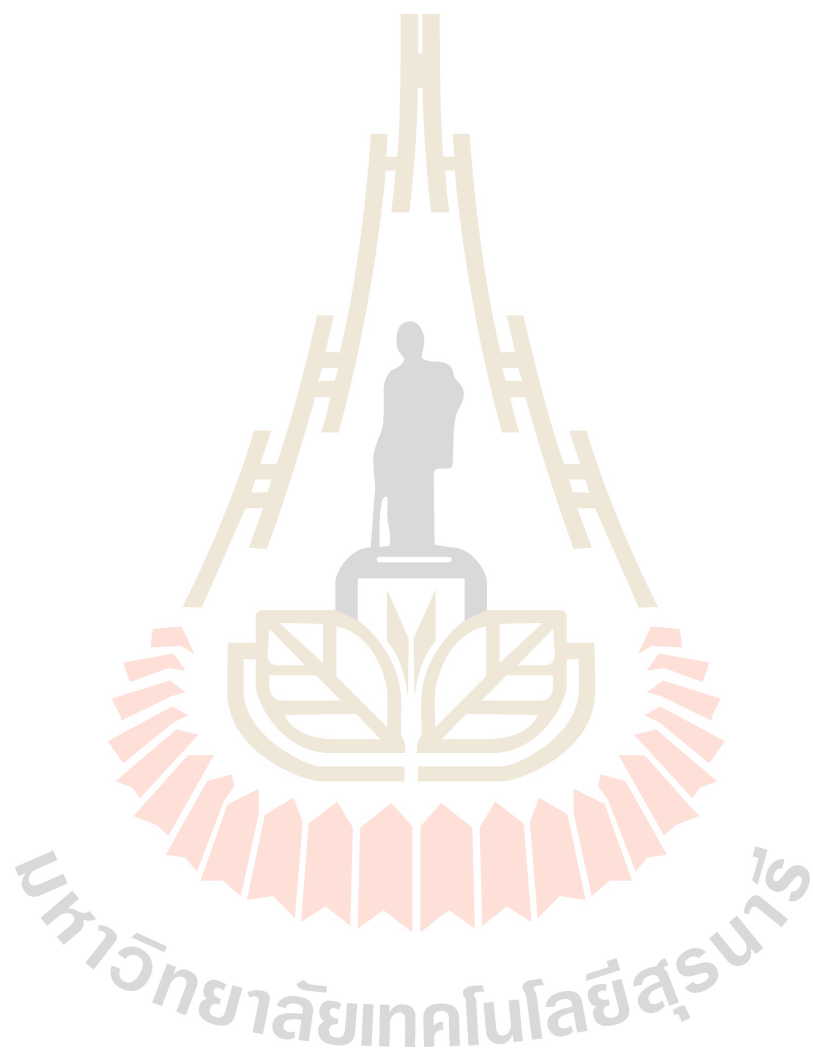
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

87

ภาคผนวก ข

98



สารบัญรูปภาพ

เรื่อง

หน้าบทที่ 1 บทนำ

รูปที่ 1.1	การแสดงผลของที่นอนอัจฉริยะที่เป็นเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับที่ร่างกายกระทำต่อที่นอน	2
รูปที่ 1.2	เตียงอัจฉริยะของบริษัท เบดเดอลี จำกัด	3
รูปที่ 1.3	การแสดงผลของเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับของร่างกาย บนที่นอน ผ่าน Mobile application ที่ใช้เฝ้าระวัง แจ้งเตือน และควบคุมเตียงอัจฉริยะ	3
รูปที่ 1.4	ภาพแสดงการเตรียม (a) เซนเซอร์ GR/PDMS sponge. (b) ภาพถ่าย SEM ของ GR/PDMS sponge และ (c) กราฟ Raman spectrum ของ graphene, PDMS และ GR/PDMS sponge. [3]	6
รูปที่ 1.5	(a) แสดงเซนเซอร์วัดแรงกดแบบไร้สายชนิด GR/PDMS sponge. (b) ภาพแสดงการกลไกการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าภายใต้แรงกด (c) การทำงานของเซนเซอร์แบบระบบไร้สาย (d) ไดอะแกรมของ LC wireless pressure sensor และ (e) แสดง equivalent circuit และ resonant frequency variation ของเซนเซอร์วัดแรงกดแบบไร้สาย [3]	7
รูปที่ 1.6	แสดง Frequency variation ของเซนเซอร์วัดแรงกดแบบไร้สาย (a) กราฟความถี่ที่แรงกดต่างๆ (b) ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงภายใต้แรงกด (c) Resonant frequency curves ที่สอดคล้องกับการงอของนิ้วมือ (d)-(f) ค่า Capacitance ที่สอดคล้องกับการกลืน การยิ้มและการขมวดคิ้ว [3]	8
รูปที่ 1.7	การสร้างอาร์เรย์เซ็นเซอร์อุณหภูมิและแรงกดทับจัดวางเรียงเป็นกริด 4x4	9
รูปที่ 1.8	บล็อกเชิงฟังก์ชันการอ่านค่าอาร์เรย์ตรวจจับแรงกดทับ	9
รูปที่ 1.9	เมทริกซ์อาร์เรย์เซ็นเซอร์อาร์เรย์แรงดันแบบหลายชั้น	10
รูปที่ 1.10	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการอ่านค่าเมทริกซ์ตัวต้านทานประกอบด้วยสองตัว มัลติเพล็กซ์เซอร์และตัวแปลงดิจิตอลแบบอนาล็อก	11

บทที่ 2 การออกแบบหมึกนำไฟฟ้าเพื่อทดแทนหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในท้องตลาด

รูปที่ 2.1	วิธีการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าลงบนผ้าคอตตอน	18
------------	--------------------------------------	----

รูปที่ 2.2 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่อง Digital Multimeter (UNI-T UT136B Auto Range Digital Multimeter)	21
รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์การยึดเกาะและพื้นที่ผิวของหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Stereo microscope	22
รูปที่ 2.4 การวัดความหนาของหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (Table-top (W-SEM) JEOL Neoscope JCM-5000)	22
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080	23
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่างจากจุด เริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า	24
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA ในปริมาณ X, 2X, 3X, 4X และ 5X ตามลำดับ และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย	25
รูปที่ 2.8 ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่าง 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มี ตัวเชื่อมประสานชนิด VA ในปริมาณ X, 2X, 3X, 4X และ 5X ตามลำดับ และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย	26
รูปที่ 2.9 ภาพถ่าย Optical microscope ที่กำลังขยาย 5 เท่า ของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำ เป็นตัวทำละลายเคลือบบนผ้าคอตตอน โดยมีตัวเชื่อมประสานชนิด VA ในปริมาณ X, 2X, 3X, 4X และ 5X ตามลำดับ และหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene- Ink P080 (Commercial)	27
รูปที่ 2.10 ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA binder ในปริมาณ X, 2X, 3X และ 4X และใช้ NMP เป็นตัวทำละลายเทียบกับหมึกนำไฟฟ้านำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 (Commercial)	28
รูปที่ 2.11 ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อม ประสานชนิด PVA binder ในปริมาณ X, 2X, 3X และ 4X และใช้ NMP เป็น ตัวทำละลายเทียบกับหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 (Commercial)	29

- รูปที่ 2.12 ภาพถ่าย Optical microscope ที่กำลังขยาย 5 เท่า ของหมึกนำไฟฟ้าที่ไม่ใช้น้ำ 30
เป็นตัวทำละลายเคลือบบนผ้าคอตตอน โดยมีตัวเชื่อมประสานชนิด PVA binder
ในปริมาณต่างกัน
- รูปที่ 2.13 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm 31
ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA , AC1 และ AC2 ปริมาณ 2X และใช้น้ำ
เป็นตัวทำละลายเทียบกับหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080
(Commercial)
- รูปที่ 2.14 ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่อระยะทางที่ระยะห่าง 2 - 20 cm 32
ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด WVA,WAC1 และ WAC2 ปริมาณ
2X และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
- รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางเทียบกับปริมาณ 2X 33
ของสูตรที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและมีตัวเชื่อมประสานชนิด VA, AC1 และ AC2
- รูปที่ 2.16 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า ของหมึกนำไฟฟ้าใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่เคลือบ 33
บนผ้าคอตตอน โดยมีตัวเชื่อมประสานชนิดที่แตกต่างกัน
- รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความหนาของหมึกนำไฟฟ้าใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่เคลือบบนผ้าคอตตอน 34
โดยมีตัวเชื่อมประสานชนิดที่แตกต่างกัน
- รูปที่ 2.18 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm 35
ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด NMPVA, NMPAC1 และ
NMPAC2 ปริมาณ 2X และไมใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
- รูปที่ 2.19 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm 37
ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC2 ในปริมาณต่างๆ
ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า
- รูปที่ 2.20 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่าง 2 - 20 cm 38
ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC2 ในปริมาณ Y, 2Y, 3Y และ 4Y
โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า
- รูปที่ 2.21 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางเทียบกับปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด 38
AC2 โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

รูปที่ 2.22 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า ของหมึกนำไฟฟ้าที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เคลือบบนผ้าคอตตอน โดยมีตัวเชื่อมประสานชนิด AC2 ในปริมาณต่างกัน	39
รูปที่ 2.23 ความหนาของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด Bronze binder โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย	40
รูปที่ 2.24 แผนภาพแสดงวิธีการเตรียมสารผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสารเชื่อมประสาน	42
รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงวิธีการเตรียมหมึกนำไฟฟ้า	44
รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนนำไปเคลือบสารเคลือบผ้า	45
รูปที่ 2.27 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบผ้าและขั้นตอนการพ่นเคลือบ	46
รูปที่ 2.28 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	47
รูปที่ 2.29 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 0 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	48
รูปที่ 2.29 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 0 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ต่อ	49
รูปที่ 2.30 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 7 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	49
รูปที่ 2.30 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 7 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ต่อ	50
รูปที่ 2.31 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 14 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	51
รูปที่ 2.32 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 21 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	52
รูปที่ 2.33 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 28 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	53
รูปที่ 2.34 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	54
รูปที่ 2.34 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ต่อ	55

รูปที่ 2.35	แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของสารเชื่อมประสานและกราฟีน หมึกนำไฟฟ้าที่บ่มไว้ 0 วันและหมึกนำไฟฟ้าที่บ่มไว้ 2 เดือน	56
รูปที่ 2.36	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 0 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	57
รูปที่ 2.37	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 7 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	58
รูปที่ 2.38	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 14 วัน และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ต่อ	59
รูปที่ 2.39	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 21 วัน และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	60
รูปที่ 2.40	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 28 วัน และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ	61
รูปที่ 2.41	ตัวอย่างชิ้นงานการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าของวงจรถูก ที่ผ่านสารเคลือบกันความชื้น	66
รูปที่ 2.42	ผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อผ่านและไม่ผ่านการเคลือบสารกันความชื้น	67
บทที่ 3	อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ ด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า	
รูปที่ 3.1	การสกรีน แบบลายวงจรถูกด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า	69
รูปที่ 3.2	การวาง spacer และแผ่น piezoresistive elastomer บนแบบลายวงจรถูก สกรีนด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า	70
รูปที่ 3.3	การทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก	71
รูปที่ 3.4	การทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine	72
รูปที่ 3.5	ผลการวัดจากตุ้มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 1	72
รูปที่ 3.6	ผลการวัดจากตุ้มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 2	73

สารบัญตาราง

เรื่อง

หน้า

บทที่ 2 การออกแบบหมึกนำไฟฟ้าเพื่อทดแทนหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในท้องตลาด

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทั่วไปของผงแกรฟีนที่ใช้ในการทดลอง (HDPlas® FLG , Haydale)	17
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า (Haydale SYNERG Graphene Ink P080)	17
ตารางที่ 2.3 สูตรหมึกนำไฟฟ้าชนิดที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่ปริมาณของตัวเชื่อมประสาน กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์	19
ตารางที่ 2.4 สูตรหมึกนำไฟฟ้าชนิดที่ใช้ N-methyl pyrrolidone (NMP) เป็นตัวทำละลายที่ปริมาณของตัวเชื่อมประสานกลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์	19
ตารางที่ 2.5 สูตรหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีชนิดตัวเชื่อมประสานต่างกัน	20
ตารางที่ 2.6 สูตรหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ NMP เป็นตัวทำละลายที่มีชนิดตัวเชื่อมประสานต่างกัน	20
ตารางที่ 2.7 สูตรหมึกนำไฟฟ้าชนิดที่ใช้ NMP เป็นตัวทำละลายที่ปริมาณของตัวเชื่อมประสาน AC2 แตกต่างกัน	20
ตารางที่ 2.8 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าทางการค้าที่มีจำนวน ชั้นที่สกรีน 1, 2 และ 3 ชั้น ตามลำดับ	23
ตารางที่ 2.9 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตรน้ำที่มีปริมาณ ตัวเชื่อมประสานชนิด VA ต่างๆกัน	25
ตารางที่ 2.10 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตรใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย ที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA ปริมาณ X, 2X, 3X, 4X และ 5X ตามลำดับ	28
ตารางที่ 2.11 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตรใช้น้ำเป็น ตัวทำละลายที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA , AC1 และ AC2 ปริมาณ 2X เท่ากัน โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย	30
ตารางที่ 2.12 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตร non-water base 35 ที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA, AC1 และ AC2 ปริมาณ 2X เท่ากัน โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย	

ตารางที่ 2.13 ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้า	36
สูตร non water base ที่มีส่วนเชื่อมประสานชนิด PVA binder , Acrylic binder และ Bronze binder ปริมาณ 0.16 g เท่ากัน โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย	
ตารางที่ 2.14 สูตร binder ที่ใช้สารพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสารเชื่อมประสานที่ใช้ในการทดลอง	41
ตารางที่ 2.15 ตารางแสดงส่วนผสมระหว่าง P และ G, S เป็นสารช่วยกระจายตัวและกราฟีน	42
ตารางที่ 2.16 ตารางแสดงส่วนผสมการเตรียมสารเคลือบผ้า	44
ตารางที่ 2.17 ผลทางกายภาพของหมึกที่ปั๊มไว้เป็นระยะเวลานานด้วยกล้องจุลทรรศน์	62
แบบใช้แสงของหมึก Gr1PG ที่ผ่านการปั๊ม 0 วัน 7 วัน 14 วัน 21 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ	
ตารางที่ 2.18 ผลทางกายภาพของหมึกที่ปั๊มไว้เป็นระยะเวลานานด้วยกล้องจุลทรรศน์	63
แบบใช้แสงของหมึก Gr2PG ที่ผ่านการปั๊ม 0 วัน 7 วัน 14 วัน 21 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ	
ตารางที่ 2.19 ผลทางกายภาพของหมึกที่ปั๊มไว้เป็นระยะเวลานานด้วยกล้องจุลทรรศน์	64
แบบใช้แสงของหมึก Gr3PG ที่ผ่านการปั๊ม 0 วัน 7 วัน 14 วัน 21 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ	
ตารางที่ 2.20 ผลการทดลองความกันน้ำของผ้าที่ผ่านการเคลือบผ้ากันน้ำ	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จากการพัฒนานวัตกรรม Smart mattress ที่ใช้ในการวัดแรงกดทับบนที่นอนเพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดแรงกดทับจากการนอนของผู้ป่วยติดเตียง พบว่า ต้นทุนของการสร้างชุดเซนเซอร์ของ Smart mattress มีต้นทุนสูงเนื่องจากต้องนำเข้าวัสดุนำไฟฟ้าจากต่างประเทศ และมีอายุการใช้งานของวัสดุนำไฟฟ้ามีจำกัด จึงทำให้จำเป็นต้องคิดค้นวัสดุหมึกนำไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำและมีอายุการใช้งานที่นานกว่าเดิม ซึ่งจะส่งผลให้สามารถสร้าง Smart mattress ตลอดจน wearable sensor device ในรูปแบบที่ยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และการใช้งานได้หลากหลายได้ในต้นทุนที่ต่ำ โดยปัจจุบัน ค่าหมึกนำไฟฟ้านำเข้า มีราคากิโลกรัมละ 8000บาท ถึง 40000บาท และมีอายุการใช้งาน 6 เดือน หากโครงการนี้เสร็จสิ้นลง คาดว่าจะสามารถลดต้นทุนลงได้กว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และสามารถควบคุมอายุการใช้งานของวัสดุหมึกไฟฟ้าที่เตรียมเองได้

นอกจากนี้ โครงการนี้คาดว่าจะต้องรู้ที่พัฒนาวัสดุหมึกนำไฟฟ้า เพื่อต่อยอดและนำไปสร้างนวัตกรรมเซนเซอร์วัดแรงกดทับ หรือวัดการสัมผัส บนผ้า สิ่งทอ เสื้อผ้า ผ้าปูที่นอน เฟอร์นิเจอร์ ตลอดจนถึงพื้นผิวอื่นๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าต้นแบบ ที่มีต้นทุนต่ำ มีความทนทาน และสกรีนทำลวดลายลงบนผ้าหรือสิ่งทอได้
2. เพื่อพัฒนาเซนเซอร์เชิงอิเล็กทรอนิกส์บนผ้าต้นแบบที่มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นและทนทาน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้คือ ได้ต้นแบบของหมึกนำไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำ สำหรับใช้ในการสกรีนหรือพิมพ์ เพื่อทำเป็นลวดลายบน ผ้า สิ่งทอ เสื้อผ้า ผ้าปูที่นอน เฟอร์นิเจอร์ และประยุกต์ใช้งานอื่นๆ ซึ่งสามารถจดสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรได้

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้แก่ บริษัท ภาคเอกชน หน่วยงานของภาครัฐ ที่มีความสนใจจะพัฒนาวัสดุ อุปกรณ์สำหรับใช้หมึกนำไฟฟ้าเพื่อการประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น E-textile, เซนเซอร์ที่สวมใส่ได้ และอื่น อาทิ เช่น หากนำหมึกนำไฟฟ้านี้ ไปสกรีนเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนแผ่น flexible circuit ซึ่งเป็นระบบเซ็นเซอร์แบบ

สวมใส่ได้ เช่น แผ่นรองรองเท้าอัจฉริยะ Surasoles ซึ่งเป็นแผ่นรองรองเท้าวัดแรงกดทับและวิเคราะห์การเดินและวิ่งของบริษัทสุรเทค จำกัดจำกัด ซึ่งเป็นบริษัท Startup ที่ต่อยอดธุรกิจ (Spin off) จากผลงานวิจัยและพัฒนาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเช่นกัน โดยนวัตกรรมหมึกนำไฟฟ้านี้ จะสามารถใช้เพื่อทดแทน flexible circuit ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศได้ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง

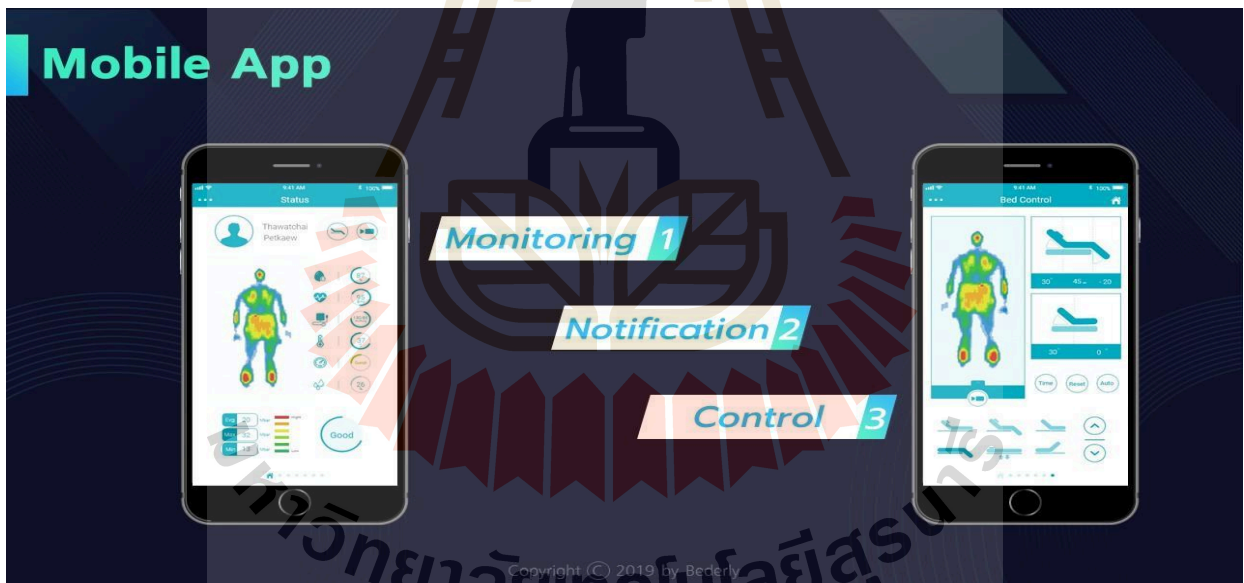
นอกจากนี้ หากนำหมึกนำไฟฟ้าที่พัฒนาจากโครงการนี้ ไปประยุกต์ต่อยอดเป็นเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนที่นอนที่มีลักษณะเป็น Electronic textile เช่น Smart mattress ซึ่งเป็นนวัตกรรม ของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับแรงกดทับที่เกิดจากแรงกดจากร่างกายของผู้ป่วยนอนติดเตียงกระทำลงสู่ที่นอน เพื่อคอยเฝ้าระวังและแจ้งเตือนให้ผู้ดูแลทราบเมื่อมีความเสี่ยงที่จะเกิดแผลกดทับ โดยทำงานร่วมกับนวัตกรรม Smart Bed ของบริษัท เบดเดอลี จำกัด เป็นบริษัท Startup ที่ต่อยอดธุรกิจ (Spin off) จากผลงานวิจัยและพัฒนาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดย Smart Bed เป็นเตียงที่มีความสามารถในการช่วยกระจายแรงกดทับของผู้ป่วยนอนติดเตียงเพื่อป้องกันการเกิดแผลกดทับ และ ช่วยอำนวยความสะดวกในการพลิกตัวผู้ป่วยแก่ผู้ดูแลให้สามารถดูแลผู้ป่วยได้ง่ายและสะดวกขึ้น โดยหมึกที่พัฒนาจากโครงการนี้ สามารถลดต้นทุนหรือทรัพยากร ส่งผลให้ได้เทคโนโลยีมีต้นทุนต่ำกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้เทคโนโลยีของคนไทยมีราคาที่ถูกค่าหลากหลายกลุ่มเป้าหมายสามารถเข้าถึงได้ง่าย ทำให้สามารถยกระดับคุณภาพชีวิตได้ทั้งผู้สูงอายุและผู้ป่วยนอนติดเตียงรวมทั้งผู้ดูแลในชุมชนและสังคมได้ ส่งผลให้เทคโนโลยีไทยเข้าถึงและเป็นประโยชน์ต่อคนไทยได้อย่างแท้จริง



รูปที่ 1.1 การแสดงผลของที่นอนอัจฉริยะที่เป็นเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับที่ร่างกายกระทำต่อที่นอน



รูปที่ 1.2 เติงอัจฉริยะของบริษัท เบดเดอลี่ จำกัด



รูปที่ 1.3 การแสดงผลของเซนเซอร์วัดแรงกดทับของร่างกาย บนที่นอน ผ่าน Mobile application ที่ใช้ผ้าระวัง แจ็งเตือน และควบคุมเตียงอัจฉริยะ

1.4 ทฤษฎีหรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ปัจจุบันการพัฒนาอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สามารถสวมใส่ได้ หรือติดกับตัวผู้ใช้งานได้รับความสนใจมากขึ้น ซึ่งสามารถเชื่อมต่อข้อมูลได้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ และส่งข้อมูลได้ในทันที (Real time) ทำให้สามารถปรับปรุงและปรับเปลี่ยนการใช้งานได้อย่างอัจฉริยะ อุปกรณ์เหล่านั้นต้องการเซนเซอร์และวัสดุนำไฟฟ้าที่สามารถเข้ากับได้ดีกับผ้า พลาสติก หรือวัสดุที่นำมาใช้งาน นอกจากนี้ยังต้องการน้ำหนักเบา ยืดหยุ่นได้ดี มีความบางที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความรู้สึกสะดวกและสบายในขณะที่ใช้งาน การวิจัยได้พัฒนาเซนเซอร์หลากหลายชนิด ได้แก่ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เซนเซอร์วัดแรงกดทับ เซนเซอร์ที่มีสมบัติด้านไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electromagnetic induced sensor) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น เพื่อสุขภาพ เพื่อกีฬา เพื่อปรับพฤติกรรมของผู้บริโภคและผู้สูงอายุ และ เพื่อเฝ้าระวังตรวจจับสัญญาณชีพ หรือความผิดปกติ เป็นต้น

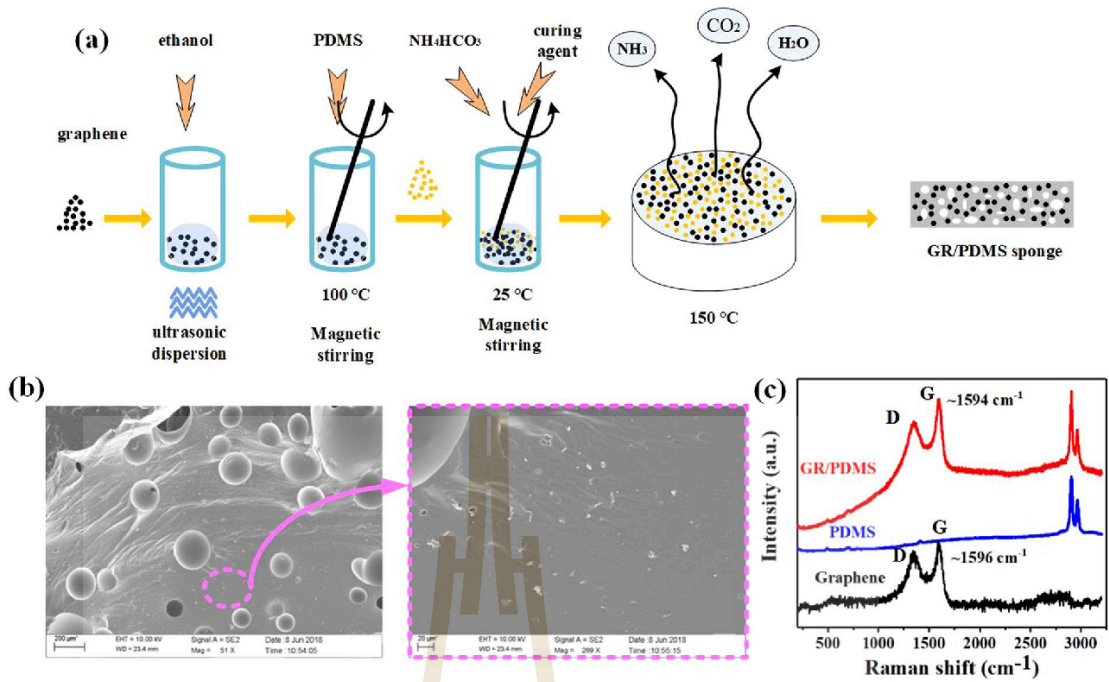
วัสดุนำไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นวัสดุชนิดโลหะที่มีการนำไฟฟ้าได้ดี และได้มีการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ใหม่ที่สามารถพับ งอได้ โดยการนำไปสกรีน หรือพิมพ์ลงบนพลาสติก โดยวัสดุโลหะเหล่านั้นได้แก่ ทอง ทองแดง เงิน แพลทินัม ซึ่งมีราคาแพง และนำไฟฟ้าได้สูงแต่อาจจะอันตรายต่อผู้ใช้งานที่ต้องแนบและสัมผัสกับร่างกาย จึงได้มีการคิดค้นวัสดุใหม่ๆ ที่มีสมบัตินำไฟฟ้า และสมบัติทางไฟฟ้าได้ดี และราคาถูกกว่า เพื่อนำมาใช้ในรูปแบบหมึกที่สามารถสกรีนทำเป็นลวดลายได้ จากการค้นคว้าข้อมูลพบว่า มีหมึกนำไฟฟ้าที่จำหน่ายในท้องตลาด และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยหมึกเหล่านั้นมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่หลากหลาย และราคาที่แตกต่างกัน นอกจากนี้พบว่าหมึกที่ขายในปัจจุบันจะสกรีนได้บนผิวพลาสติก ทำให้ทีมวิจัยได้รับโจทย์จากบริษัทเบดเดอลี่ จำกัด เพื่อทำเซนเซอร์วัดแรงกด และหมึกนำไฟฟ้าสำหรับการวัดแรงกดทับบนที่นอน ที่ทำด้วยผ้า เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำ และปรับลดต้นทุนให้ถูกลง โครงการวิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะวิจัย พัฒนาวัสดุนำไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบหมึก สียอมที่มีราคาถูกสำหรับใช้สกรีนทำลวดลายบนผ้า ที่นอน และออกแบบหมึกใช้ตอบสนองต่อการใช้งานและออกแบบของ Smart mattress ซึ่งใช้วัสดุคาร์บอน ในรูปของ Carbon nanotube, Graphene ซึ่งมีราคาถูกและมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวและมีค่าการนำไฟฟ้าและสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีได้ การวิจัยและพัฒนาหมึกนำไฟฟ้ามีการศึกษาวิจัยต่อมาอย่างกว้างขวาง

Francisco Pizarro และคณะ (Francisco Pizarro, Piero Villavicencio et al. 2018) ได้ออกแบบและสร้างเซ็นเซอร์ความต้านทานทานอย่างง่ายจากแผ่นป้องกันไฟฟ้าสถิตย์จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและประกบทั้งสองด้านด้วยผ้าทอนำไฟฟ้า เซ็นเซอร์ความต้านทานที่ได้ถูกประเมินค่าในแง่ของการตอบสนองต่อค่าความต้านทานในรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงเส้น การทำซ้ำ และระยะเวลาในการคืนสภาพ พบว่าระยะเวลาคืนสภาพเฉลี่ย 22 – 35 วินาที ขึ้นอยู่กับแรงกดที่ให้ในช่วง 2 – 70 KPa และเวลาการคืนสภาพที่ 0 – 17 วินาที เป็นค่าการคืนสภาพ 90 % จะสังเกตได้ว่าในกรณีนี้แรงกดที่ต่ำกว่า 10 kPa เวลาในการคืนสภาพ มีค่าต่ำกว่า 2 วินาที

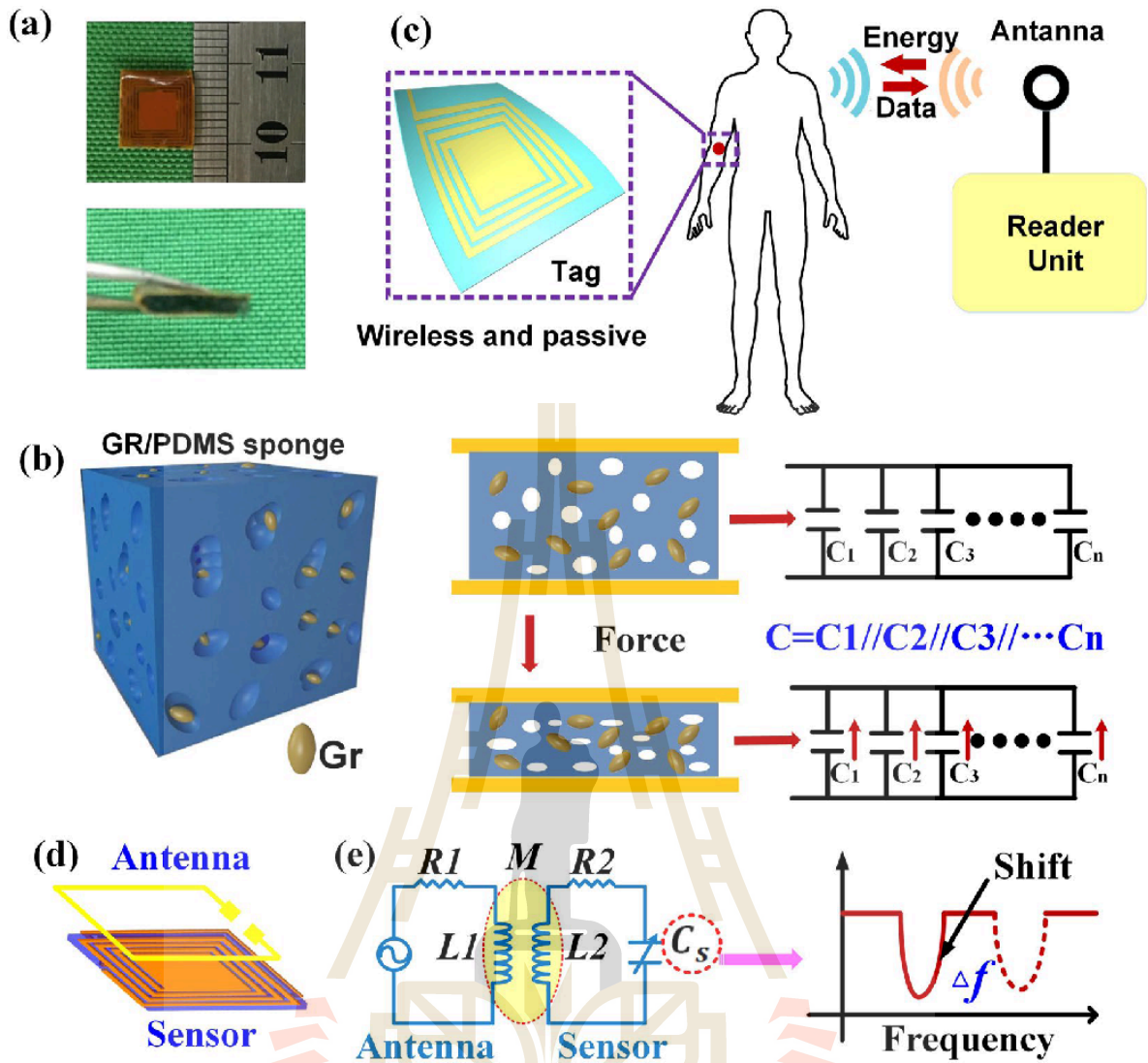
นอกจากนี้การลดระยะเวลาการคืนสภาพทำได้โดยการเปลี่ยนแผ่นป้องกันไฟฟ้าสถิตย์และวิธีการยึดติดระหว่างแผ่น เซนเซอร์ที่อาจมีคุณสมบัติยืดหยุ่นต่างกัน

Feixiang Liu และคณะ (Feixiang Liu, Xinbin Qiu et al. 2019) คิดค้นหมึกนำไฟฟ้ากราฟีนที่มีการกระจายตัวที่ดี มีค่าการนำไฟฟ้าและความโปร่งใสสูง โดยในงานวิจัยนี้ใช้ กราฟีนทางการค้าที่มีจำนวนชั้นน้อยกว่า 10 ชั้น และใช้เอทานอลกับน้ำในอัตราส่วน 2 : 1 โดยปริมาตรเป็นสารละลายผสมที่ใช้สำหรับกระจายอนุภาคของกราฟีน ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นมันติวอล (multi-walled carbon nanotubes) เพื่อเป็นโครงข่ายสำหรับยึดกราฟีน พอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone) เป็นสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้เกิดการกระจายตัว และเกิดความเสถียรสำหรับหมึกกราฟีน หมึกที่เตรียมได้ติดบนวัสดุพิมพ์ที่ด้วยวิธี การหยดชั้นรูป (drop-casting), การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin-coating) และการพิมพ์แบบอิงเจ็ท (inkjet-printing) ความต้านทานของแผ่นฟิล์มหมึกที่ผ่านการทดสอบมีค่า 180 Ω/sq และมีค่าการส่องผ่านแสงที่ 90%

Hairong Kou และคณะ (Hairong Kou, Lei Zhang et al. 2019) นำเสนอเซ็นเซอร์ความดันไร้สายที่ยืดหยุ่นได้ผลิตจากกราฟีน/พอลิไดเมทิลซิล็อกเซน (polydimethylsiloxane) (GR/PDMS) เป็นวัสดุชั้นไดอิเล็กทริกซึ่งถูกประกบด้วยลายพิมพ์ทองแดงบนวงจรไฟฟ้าพิมพ์ที่ยืดหยุ่นได้ซึ่งถูกใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด GR/PDMS กับแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (NH_4HCO_3) ความเข้มข้น 20% และกราฟีน 2% เป็นชั้นไดอิเล็กทริก แสดงประสิทธิภาพและความไวสูง, ช่วงการทำงานที่กว้าง (0-500 kPa) เวลาการตอบสนองเร็วประมาณ 7 ซีตจำกัดการตรวจจับต่ำ 5 Pa, มีความเสถียร, การกลับคืน และความสามารถในการทำซ้ำที่ดี ความไวของเซ็นเซอร์ อยู่ที่ 2.2 MHz/kPa สำหรับช่วงความดันต่ำ 0-10 kPa, 230 kHz/kPa สำหรับช่วงความดันกลาง 10-100 kPa และ 37.5 kHz/kPa ในช่วงความดันสูง 100-500 kPa นอกจากนี้การใช้งานจริงของเซ็นเซอร์ความดันไร้สายที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้นได้นำมาวัดการเคลื่อนไหวของนิ้ว และการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อใบหน้าที่มีรอยยิ้มและการขมวดคิ้ว นอกจากนี้เซ็นเซอร์มีข้อดีที่ราคาถูก ทดสอบได้ง่าย มีความเสถียรสูง ไม่ต้องการแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับไร้สายที่ต้องการความไวสูง เช่นหุ่นยนต์อัจฉริยะ, ผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ไบโอนิค และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้

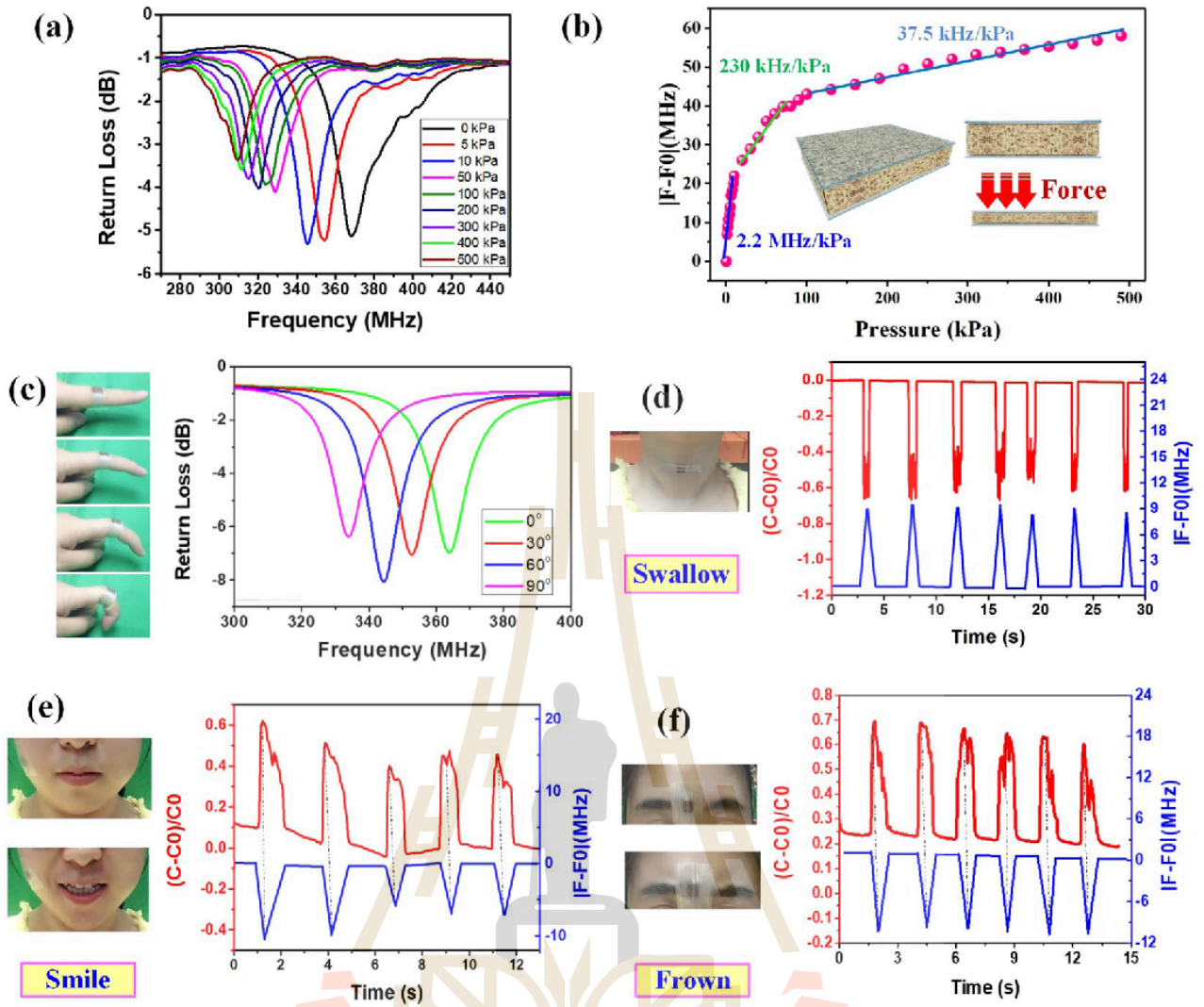


รูปที่ 1.4 ภาพแสดงการเตรียม (a) เซนเซอร์ GR/PDMS sponge. (b) ภาพถ่าย SEM ของ GR/PDMS sponge และ (c) กราฟ Raman spectrum ของ graphene, PDMS และ GR/PDMS sponge. [3]



รูปที่ 1.5 (a) แสดงเซนเซอร์วัดแรงกดแบบไร้สายชนิด GR/PDMS sponge. (b) ภาพแสดงการกลไกการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าภายใต้แรงกด (c) การทำงานของเซนเซอร์แบบระบบไร้สาย (d) ไดอะแกรมของ LC wireless pressure sensor และ (e) แสดง equivalent circuit และ resonant frequency variation

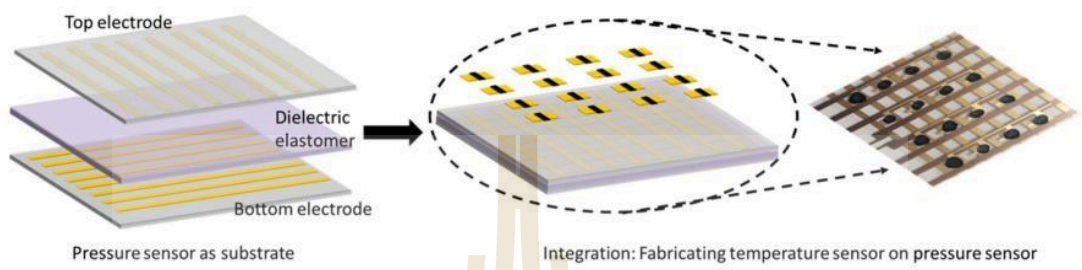
ของเซนเซอร์วัดแรงกดแบบไร้สาย [3]



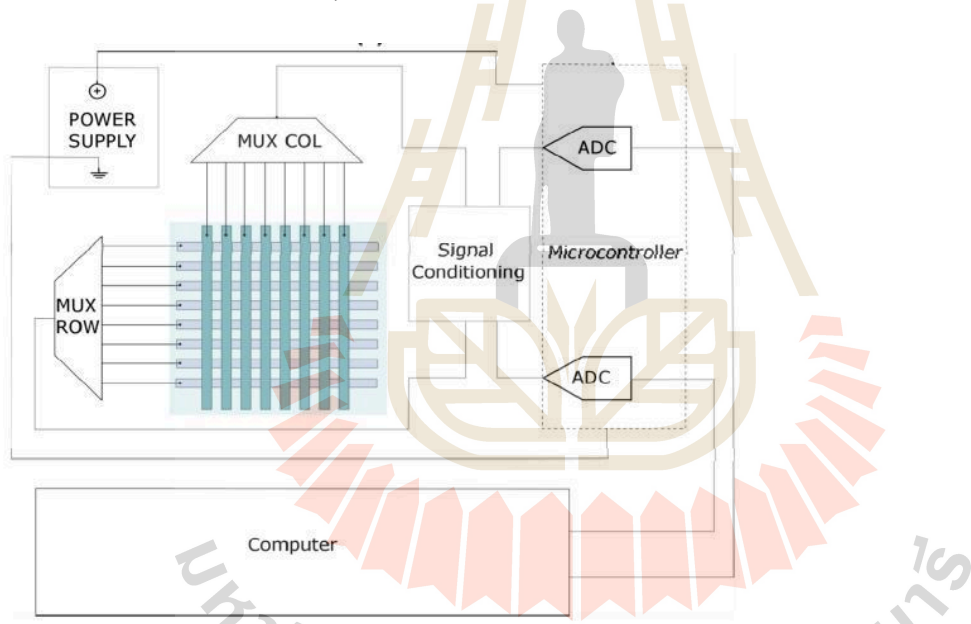
รูปที่ 1.6 แสดง Frequency variation ของเซ็นเซอร์วัดแรงกดแบบไร้สาย (a) กราฟความถี่ที่แรงกดต่างๆ (b) ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงภายใต้แรงกด (c) Resonant frequency curves ที่สอดคล้องกับการงอของนิ้วมือ (d)-(f) ค่า Capacitance ที่สอดคล้องกับการกลืน การยิ้มและการขมวดคิ้ว [3]

สำหรับงานวิจัยที่พัฒนาอาร์เรย์เซ็นเซอร์นั้น Weifeng Liu และคณะ (Weifeng Liu, Jie Lian, Zhen Feng, Anwar Mohammed, Murad Kurwa.2020) ได้ทำการคิดค้นการเชื่อมต่อระหว่างเซ็นเซอร์ขั้นตอนวิธีการทำ โดยเริ่มต้นจากการจัดวางขั้วสเตรตนาไฟฟ้าที่ไวต่อแรงกดทับ ประกบด้านบนและล่างของขั้วสเตรตด้วยชั้นชั้นไดอิเล็กทริก และชั้นหมึกนำไฟฟ้า บนพื้นผิวด้านนอกของชั้นฉนวนแต่ละชั้น โดยในชั้นไดอิเล็กทริกทั้งสองชั้น จะมีช่องที่เป็นโพรงซึ่งจัดวางอยู่ในตำแหน่งตรงกันในแนวตั้งกับช่องโพรงไดอิเล็กทริกชั้นบน โดยในช่องโพรงดังกล่าว จะได้รับการเติมหมึกนำไฟฟ้าเพื่อสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานได้

Yogeenth Kumaresan และคณะ (Yogeenth Kumaresan , Oliver Ozioko, Ravinder Dahiya.2021) ได้ทำการคิดค้นอิเล็กทรอนิกส์แบบมัลติฟังก์ชัน ที่ประกอบด้วยอาร์เรย์เซ็นเซอร์อุณหภูมิและแรงกดทับจัดวางเรียงเป็นกริดตามรูปที่ 1 โดยวงจร Data Acquisition ใช้ไมโครชิป 8 บิต Atmega 2560 ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR พร้อมหน่วยความจำแฟลช 256 kB ซึ่งเป็น 10 บิต 16 ช่อง Analog to Digital Converter (ADC) ตามรูปที่ 2



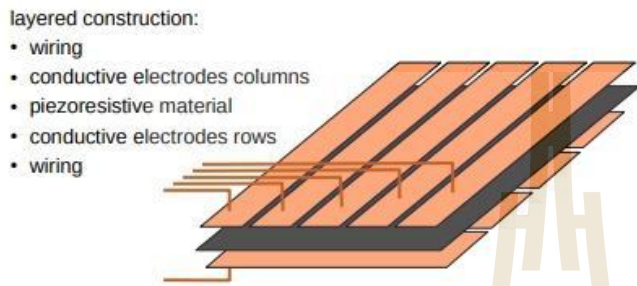
รูปที่ 1.7 การสร้างอาร์เรย์เซ็นเซอร์อุณหภูมิและแรงกดทับจัดวางเรียงเป็นกริด 4x4 (Yogeenth Kumaresan , Oliver Ozioko, Ravinder Dahiya.2021)



รูปที่ 1.8 บล็อกเชิงฟังก์ชันการอ่านค่าอาร์เรย์ตรวจจับแรงกดทับ (Yogeenth Kumaresan , Oliver Ozioko, Ravinder Dahiya.2021)

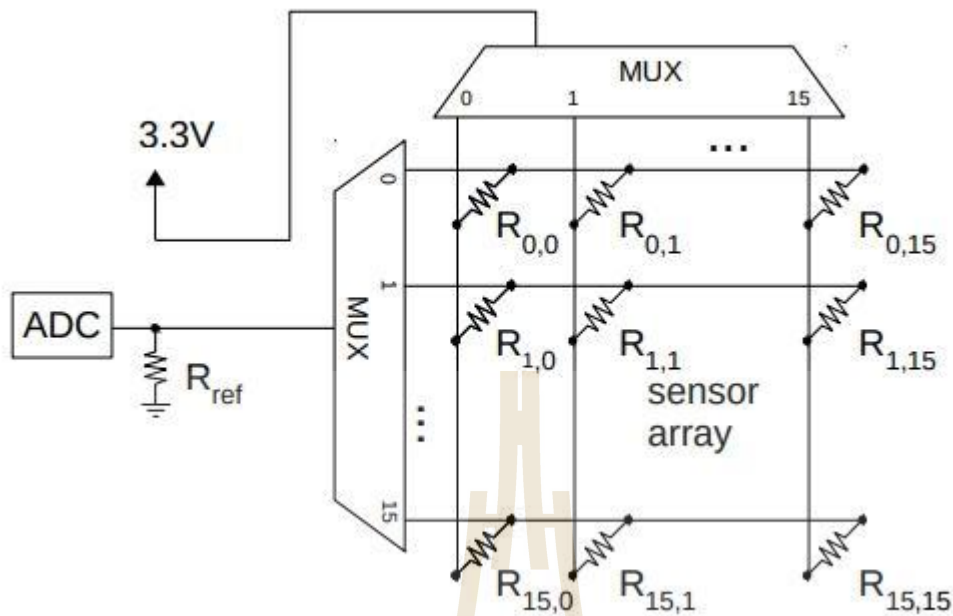
ค่าความต่างศักย์ของเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงตามแรงกดทับที่เกิดขึ้น เมื่อจุดสัมผัสของแต่ละแถว (เส้น Tx) และคอลัมน์ (เส้น Rx) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์แต่ละจุดถูกกด โดยใช้มัลติเพล็กซ์เซอร์ 8 ช่อง CD74HC4051 สองตัว ทำให้สามารถอ่านทั้งแถวและคอลัมน์ของอาร์เรย์ได้ และบันทึกเอาต์พุตของ Atmega 2560

Steffen Muller และคณะ (Steffen Muller, Daniel Seichter, Horst-Michael Gross.2019) ได้พัฒนาเมทริกซ์อาร์เรย์เซ็นเซอร์ขนาด 16×16 เซลล์ ที่ประกอบด้วย วัสดุป้องกัน EMF เคลือบสีเงินเป็นอิเล็กโทรดแถวและคอลัมน์ โดยอิเล็กโทรดถูกวางไว้บนผ้าที่เว้นระยะห่าง 6 มม. ซึ่งขนาดค่อนข้างใหญ่ เพื่อลดกระแสต้านข้างใน นอกจากนี้ ยังมีวัสดุ Piezoresistive ได้แก่ Eeontex™ ที่มีความต้านทานพื้นผิว $20 \text{ k}\Omega/\text{cm}$ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1.9 เมทริกซ์อาร์เรย์เซ็นเซอร์อาร์เรย์แรงดันแบบหลายชั้น (Steffen Muller, Daniel Seichter, Horst-Michael Gross.2019)

โดยพัฒนาระบบ Data Acquisition ด้วยวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMGA328P และมัลติเพล็กซ์เซอร์ 16 ช่องแบบอนาล็อกจำนวนสองตัว (74HD4067) เป็นเมทริกซ์ต้านทาน voltage divider ต่อด้วยตัวต้านทาน Rref ค่าของแรงกดทับที่วัดได้คือที่แรงดันไฟฟ้าที่ ถูกแปลงดิจิทัลแบบอนาล็อก (ADC) ด้าน input ของไมโครคอนโทรลเลอร์และค่า ADC จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ ผ่านพอร์ต USB ต่อไป



รูปที่ 1.10 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการอ่านค่าเมทริกซ์ตัวต้านทานประกอบด้วยสองตัว

มัลติเพล็กซ์เซอร์และตัวแปลงดิจิทัลแบบอะนาล็อก (Steffen Muller, Daniel Seichter, Horst-Michael Gross.2019)

BURGHOORN Maria Mathea Antonetta และคณะ (BURGHOORN Maria Mathea Antonetta, ZALAR Peter, VAN DEN BRAND Jeroen, RAITERI Daniele, SMITS Edsger Constant Pieter.2020) ได้พัฒนาเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับอิเล็กทรอนิกส์ที่มีส่วนประกอบที่ยืดได้ รวมถึงสายนำไฟฟ้าและชั้นต้านทาน เคลือบบนแผ่นสิ่งทอ โดยมีโครงสร้าง gas pocket ขนาดเล็กที่เก็บก๊าซกระจายอยู่บนเซ็นเซอร์ เพื่อต้านแรงกดทับจากภายนอก ส่งผลให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าที่แปรผันโดยตรงกับแรงกดทับ โดยโครงสร้างขนาดเล็กดังกล่าว ช่วยกระจายแรงกดทับอีกด้วย ทั้งลักษณะของเซ็นเซอร์ที่ยืดได้นี้ ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานสิ่งทอที่มีความหนาและค่า Young Modulus ต่ำ ให้เว็รเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับมีสัมผัสความยืดหยุ่นและความสบาย งานนี้ยังแนะนำวิธีการสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ โดยวางสายนำไฟฟ้าและชั้นต้านทานบน substrate โดยการวาง substrate ซ้อนกันพร้อม วัสดุคั่นกลางหรือ spacer ทำให้เกิดช่องบรรจุก๊าซ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการต่อต้านแรงกดทับภายนอก

จากหลายงานวิจัยและสิทธิบัตรที่ผ่านมา ได้ใช้โครงสร้างของเซ็นเซอร์แบบที่ใช้ หมึกนำไฟฟ้า หรือสายหรือแถบนำไฟฟ้าซ้อนกันเป็นลักษณะ sandwich โดยมีวัสดุคั่นกลาง หรือ spacer หรือก๊าซ เพื่อต้านแรงกดทับจากภายนอก ซึ่งการวางแนวสายหรือแถบนำไฟฟ้าที่วางซ้อนกันให้มีตำแหน่งตรงกันอาจทำได้ยาก

โครงการนี้ จึงมุ่งพัฒนาหมึกนำไฟฟ้า เพื่อสกรีนวงจรของเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับแบบอาร์เรย์ขนาดใหญ่ [4] [5] เช่น Smart mattress ซึ่งวัดแรงกดจากน้ำหนักของร่างกายที่กระทำต่อที่นอน และใช้การประมวลผลสัญญาณในการวิเคราะห์ที่นอนต่างๆ [6] โดยอาศัยหลักการสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงกดแบบ Piezoresistive บนพื้นผิว เป็นการวัดค่าแรงกดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องมีความกว้างของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูง เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดและเซ็นเซอร์วัดแรงกดจำนวนมาก และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าแรงกด ซึ่งสามารถรับข้อมูล และประมวลผลข้อมูล ผ่านระบบฝังตัวและแสดงผล การพิมพ์วงจรด้วยหมึกนำไฟฟ้าที่พัฒนาจากโครงการนี้ ทำให้เซ็นเซอร์วัดแรงกด Smart mattress นี้ มีลักษณะสัมผัสเหมือนผ้าปูที่นอน มีความยืดหยุ่นสูง น้ำหนักเบา สามารถปรับโค้งงอตามสรีระของผู้ป่วยติดเตียงได้เหมือนผ้าปูที่นอนทั่วไป

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ค้นคว้า ข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อออกแบบวางแผนการทดลอง
2. จัดหา กราฟีน คาร์บอนนาโน สารเคมีที่เป็นส่วนประกอบของหมึกนำไฟฟ้า อุปกรณ์ ติดต่อประสานงานกับหน่วยงานต่างๆ
3. เตรียมผ้า ทำความสะอาดพื้นผิว เพื่อเพิ่มการยึดเกาะ และออกแบบลวดลายของเซนเซอร์เพื่อทำการสกรีนลงบนผ้า
4. ศึกษาปัจจัยต่างๆในการเตรียมหมึกนำไฟฟ้า
 - a. หมึกนำไฟฟ้าชนิดน้ำ และหมึกนำไฟฟ้าชนิดไม่ใช้น้ำ
 - b. ชนิดและปริมาณของตัวทำละลายชนิดที่ใช้น้ำและไม่ใช้น้ำ
 - c. ชนิดและปริมาณของสารช่วยกระจายตัวและสารเพิ่มการยึดเกาะ
 - d. อุณหภูมิ เวลา วิธีการผสม
5. นำหมึกนำไฟฟ้ามาสกรีนลงบนผ้า
 - a. ศึกษาปัจจัยการอบ
 - b. ความหนาของการสกรีน
 - c. ชนิดของผ้า หรือพื้นผิว

เพื่อวัดสมบัติด้านการนำไฟฟ้า การตอบสนองต่อแรงกด ความคงทน และปรับปรุงหมึกนำไฟฟ้าให้มีสมบัติด้านไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้กับ Smart mattress และเปรียบเทียบกับหมึกนำไฟฟ้าที่มีในท้องตลาด

6. ดำเนินการประยุกต์ใช้กับ Smart mattress เพื่อใช้ทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติกับหมอนำไฟฟ้าเชิงพาณิชย์และวัสดุเดิมที่ใช้ โดยศึกษา Peak pressure detection, posture detection และระยะเวลาที่นอนในท่านอนต่างๆ
7. ดำเนินการยื่นจดอนุสิทธิบัตร หรือสิทธิบัตร และนำหมอนำไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับงานเซนเซอร์อื่นๆ

1.6 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษา ทดลองเพื่อหาต้นแบบหมอนำไฟฟ้า วัดสมบัติการนำไฟฟ้า การตอบสนองต่อแรงกดทับ ความทนทานของหมอนเมื่อใช้งาน โดยการปรับปรุงพัฒนาสูตรหมอนำไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ และตอบสนองการใช้งานเป็นเซนเซอร์อัจฉริยะ สำหรับ E-textile และ Smart mattress

1.7 ระยะเวลาที่ทำการวิจัย

เมษายน 2563 ถึง มีนาคม 2564



1.8 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

ระยะเวลาดำเนินงานและแผนปฏิบัติงาน :

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือนที่)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Phase 1												
Literature and market survey for conductive and piezoresistive substances	■	■	■									
Develop conductive and piezoresistive ink	■	■	■	■								
Test conductive and piezoresistive ink screen on fabric printer				■	■	■	■	■				
Phase 2												
Develop smart surface pressure array sensors						■	■	■	■			
Develop embedded systems							■	■	■	■		
Develop Graphics User Interface and Display			■	■	■	■	■	■	■	■		
Assemble prototype							■	■	■	■	■	
Test and adjust prototype							■	■	■	■	■	
Phase 3												
Validate prototype									■	■	■	
Conclude and prepare final report											■	■

1.9 อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับโครงการ

ห้องปฏิบัติการ F5105, อาคารศูนย์เครื่องมือ 5

ห้องทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ อาคารศูนย์เครื่องมือ 5

ห้องปฏิบัติการ F11328A, อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์



บทที่ 2

การออกแบบหมึกนำไฟฟ้าเพื่อทดแทนหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในท้องตลาด

2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. ออกแบบหมึกนำไฟฟ้าจากกราฟีน เพื่อใช้สำหรับการสกรีนปรินต์ติ้ง (screen printing) ลงบนพื้นผิวที่เป็นผ้า เพื่อสร้างเป็นวงจรไฟฟ้า
2. ศึกษาค่าความต้านทานที่ได้จากหมึกนำไฟฟ้าที่มาจากกรอกแบบสูตรต่างๆ
3. ศึกษาค่าความต้านทานที่ได้จากหมึกนำไฟฟ้าที่มาจากกรอกแบบรูปแบบการสกรีน
3. วิเคราะห์ลักษณะการยึดเกาะของหมึกที่ถูกสกรีนลงบนผ้าต่อผลของค่าความต้านทานไฟฟ้า
4. ศึกษาอายุการเก็บรักษาของหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมจากกราฟีน
5. ศึกษาวิธีการเคลือบผ้า เพื่อการป้องกันความชื้นและยืดอายุการใช้งานของผ้าสกรีนวงจร

2.2 ขอบเขตของการทดลอง

1. พัฒนาหมึกนำไฟฟ้าจากแกรฟีนให้ใช้งานแทนหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในท้องตลาด โดยในการวิจัยนี้เลือกหมึกนำไฟฟ้าแบรนด์ Haydale สำหรับใช้เพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านการนำไฟฟ้า และการยึดเกาะกับพื้นผิววัสดุที่สกรีน
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าลงบนผ้า ระยะเวลาการเก็บรักษา และระยะเวลาหลังสกรีนช่วงต่างๆ

2.3 ข้อชี้แจงในการรายงานความก้าวหน้างานวิจัย

เนื่องจากผลการวิจัยที่ได้ ได้ทำการขอยื่นจดความลับทางการค้ากับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจึงไม่สามารถระบุชนิดของสารที่เป็นองค์ประกอบและปริมาณของสูตรหมึกนำไฟฟ้าชนิดที่ประดิษฐ์ขึ้นจากงานวิจัยนี้ได้ ดังนั้นสูตรของหมึกนำไฟฟ้าต่างจึงใช้เป็น code name

ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุนำไฟฟ้าชนิดกราฟีนจากบริษัท Haydale Graphene Industries Plc โดยข้อมูลทั่วไปของ กราฟีนที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1.1 และหมึกนำไฟฟ้าทางการค้าที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับหมึกนำไฟฟ้าชนิดที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้เองมาจาก หมึกนำไฟฟ้าชนิดกราฟีน ชื่อทางการค้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 จากบริษัท Haydale Graphene Industries Plc ซึ่งมีข้อมูลของหมึกนำไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทั่วไปของผงแกรฟีนที่ใช้ในการทดลอง (HDPlas® FLG , Haydale)

Data	Measurement	Method
Bulk Density	200 – 400 kg/m ³	EN ISO 60
Amorphous Carbon	Not detected	SEM/TEM
Specific Surface Area	>650 m ² /g	BET Analysis
FLG Planar Size	0.3 – 2 μm	SEM
FLG Thickness	<10 nm	SEM

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า (Haydale SYNERG Graphene Ink P080)

Test item	Appearance
Appearance	Dark Grey Paste
Solid Content	48 – 52 %
Surface Resistance: The Properties on PET coated with bar coater, curing condition: 130 °C/ 30 min	10 – 14 Ω/sq (customize)
Viscosity	50 -60 Pa.s (customize)

2.4 วิธีดำเนินการทดลอง ตอนที่ 1

2.4.1 ความหนาชั้นหมึกนำไฟฟ้าที่สกรีนหมึกลงบนผ้าคอตต้อนต่อประสิทธิภาพของค่าความต้านทานไฟฟ้า

วิธีการสกรีนหมึกลงบนผ้าคอตต้อนโดยใช้หมึก Haydale SYNERG Graphene Ink P080

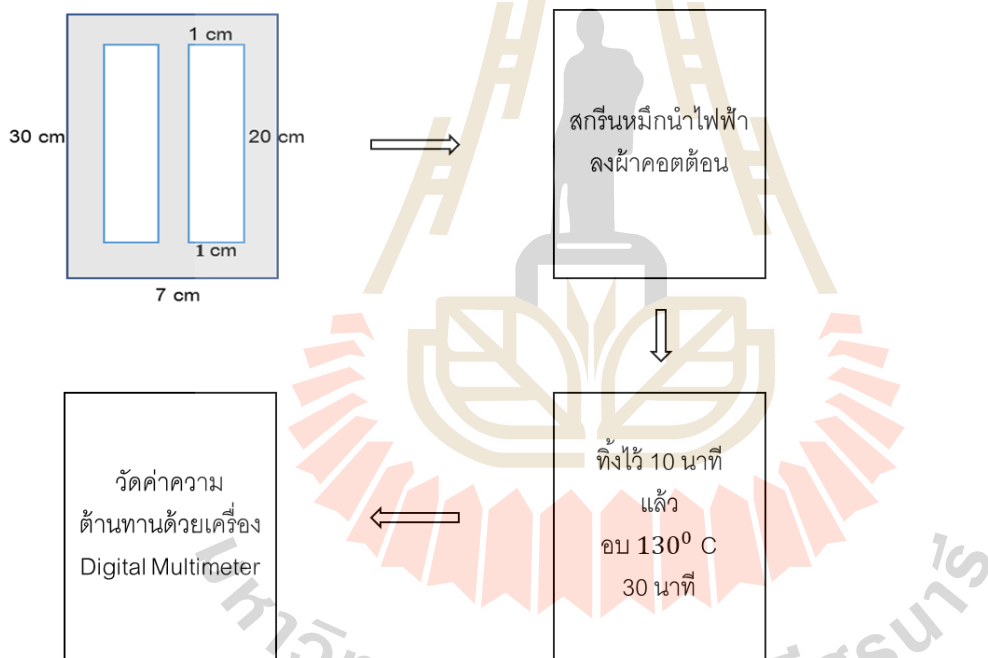
1. เตรียมผ้าคอตต้อนขนาดความกว้าง 7 cm ยาว 30 cm จำนวน 3 ผืน และเขียนหมายเลขกำกับแผ่นที่ 1, 2 และ 3
2. นำผ้าคอตต้อนวางบนแผ่นรองสกรีน เอาเทปกาวติดผ้าคอตต้อนซึ่งให้ตั้ง
3. ใช้เทปใสทำขนาดเส้น กว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร จำนวน 2 เส้น
4. ทำการสกรีน 1, 2 และ 3 ชั้น โดย ตักหมึก commercial ใส่ผ้าคอตต้อนพอประมาณจากนั้นทำการปาดหมึกจะปาดจำนวน 1 รอบ โดยการน้บรอบจะนับ ไป-กลับเท่ากับ 1 รอบ ทำการสกรีนทั้งหมด 3

ผืน ทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส 30 นาที ทั้ง 3 ผืน จะได้ผ้าสกรีนหมึก 1 ชั้น

- นำผ้าหมายเลข 2 และ 3 สกรีนซ้ำรอยหมึกเดิม วิธีการสกรีนตามข้อ 4 จะได้ผ้าสกรีนหมึก 2 ชั้น จากนั้นนำผ้าหมายเลข 3 สกรีนซ้ำรอยหมึกเดิม วิธีการสกรีนตามข้อ 4 จะได้ผ้าสกรีนหมึก 3 ชั้น
- นำผ้าทั้ง 3 ผืนไปทำการวัดและทดสอบค่าทางไฟฟ้า

วิธีการสกรีนหมึกลงบนผ้าคอตตอนโดยใช้หมึกนำไฟฟ้าชนิดประติษฐ์ขึ้นลงบนผ้าคอตตอน

- เตรียมผ้าคอตตอนขนาดความกว้าง 7 cm ยาว 30 cm
- นำผ้าคอตตอนวางบนแผ่นรองสกรีน เอาเทปกาวติดผ้าคอตตอนซึ่งให้ตั้ง
- ใช้เทปใสทำขนาดเส้น กว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร จำนวน 2 เส้น
- ตัดหมึกนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองใส่ผ้าคอตตอนพอประมาณจากนั้นทำการปาดหมึกจะปาดจำนวน 3 รอบ โดยการนับรอบจะนับ ไป-กลับเท่ากับ 1 รอบ ทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส 30 นาที
- นำผ้าไปทำการวัดและทดสอบค่าทางไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 วิธีการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าลงบนผ้าคอตตอน

2.4.2 การศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานกลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า

ในการศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานกลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า จะทำการเตรียมหมึก 2 ประเภท ได้แก่ หมึกนำไฟฟ้าชนิดใช้น้ำ DI เป็นตัวทำละลายและชนิดใช้น้ำ NMP เป็นตัวทำละลาย การเตรียมหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 สูตรหมักนำไฟฟ้าชนิดที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่ปริมาณของตัวเชื่อมประสานกลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์

สูตรหมัก	ความหมาย
WVAX	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
WVA2X	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 2X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
WVA3X	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 3X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
WVA4X	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 4X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
WVA5X	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 5X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.4 สูตรหมักนำไฟฟ้าชนิดที่ใช้ N-methyl pyrrolidone (NMP) เป็นตัวทำละลายที่ปริมาณของตัวเชื่อมประสานกลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์

สูตรหมัก	ความหมาย
NMPVAX	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPVA2X	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 2X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPVA3X	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 3X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPVA4X	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 4X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPVA5X	หมักนำไฟฟ้าประติขันธ์มีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 5X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

2.4.3 การศึกษาผลของชนิดตัวเชื่อมประสานที่มีผลต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า

ในการศึกษาผลของชนิดตัวเชื่อมประสานจะทำการเปรียบเทียบผลของการใช้ตัวเชื่อมประสานกลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ อะคริลิก1 และอะคริลิก2 ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า โดยจะทำการเตรียมหมักสูตรที่มีตัวทำละลายได้แก่ น้ำ DI และชนิดใช้ NMP เป็นตัวทำละลายดังแสดงในตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 สูตรหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีชนิดตัวเชื่อมประสานต่างกัน

สูตรหมึก	ความหมาย
WVA2X	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 2X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
WAC ₁ 2X	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มอะคริลิก1 (AC ₁) ปริมาณ 2X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
WAC ₂ 2X	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มอะคริลิก1 (AC ₂) ปริมาณ 2X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.6 สูตรหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ NMP เป็นตัวทำละลายที่มีชนิดตัวเชื่อมประสานต่างกัน

สูตรหมึก	ความหมาย
NMPVA2X	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ปริมาณ 2X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPAC ₁ 2X	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มอะคริลิก1 (AC ₁) ปริมาณ 2X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPAC ₂ 2X	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มอะคริลิก1 (AC ₂) ปริมาณ 2X เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

2.4.4 การศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า

ในการศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า จะทำการเตรียมหมึก 1 ประเภท ได้แก่ หมึกนำไฟฟ้าชนิดใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.7 สูตรหมึกนำไฟฟ้าชนิดที่ใช้ NMP เป็นตัวทำละลายที่ปริมาณของตัวเชื่อมประสาน AC₂ แตกต่าง

สูตรหมึก	ความหมาย
NMPAC ₂ Y	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มอะคริลิก1 (AC ₂) ปริมาณ Y เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPAC ₂ 2Y	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มอะคริลิก1 (AC ₂) ปริมาณ 2Y เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPAC ₂ 3Y	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มอะคริลิก1 (AC ₂) ปริมาณ 3Y เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย
NMPAC ₂ 4Y	หมึกนำไฟฟ้าประติขุมีสารพอลิเมอร์กลุ่มอะคริลิก1 (AC ₂) ปริมาณ 4Y เป็นสารเชื่อมประสานและใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

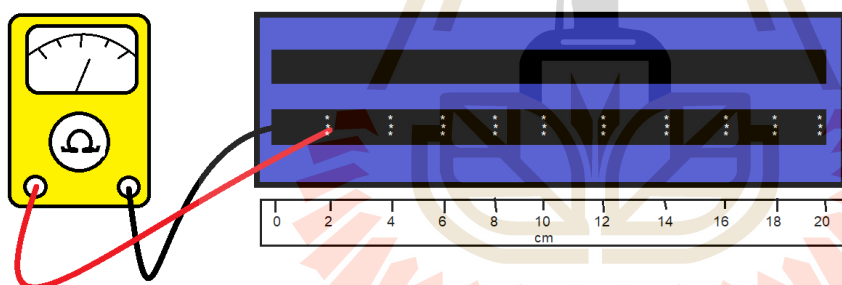
2.4.5 วิธีการเตรียมหมึกนำไฟฟ้า

1. นำสารเชื่อมประสาน ผสมกับสารทำละลายแล้วนำไปกวนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ผสมตัวทำละลายส่วนหนึ่งกับสารลดแรงตึงผิว กวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
3. เติมสารนำไฟฟ้าลงในสารละลายข้อที่ 2 จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 90 นาที
4. เติมสารละลายตัวเชื่อมประสานที่เตรียมได้จากข้อ 1 ทำการปั่นต่อ 90 นาที
5. นำหมึกที่ปั่นจนครบเวลาที่กำหนดแล้วไป Sonication เป็นเวลา 2 ชม.
6. ตักหมึกใส่ขวดเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

2.4.5 วิธีการวัดและทดสอบค่าทางไฟฟ้า

วิธีการวัดค่าความต้านทาน

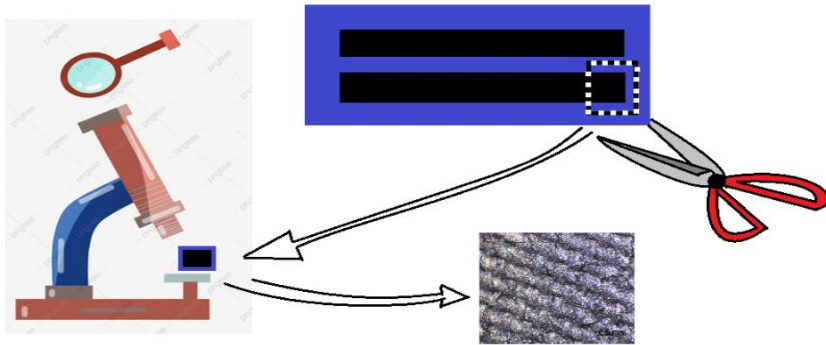
1. นำผ้าสกรีนมาวางลงโต๊ะที่มีพื้นผิวเรียบ
2. นำไม้บรรทัดมาวางเทียบผ้าสกรีนเพื่อหาระยะที่จะวัดค่าความต้านทาน
3. ทำการวัดค่า Resistance โดยใช้เครื่อง Digital Multimeter (UNI-T UT136B Auto Range Digital Multimeter) วัดจากจุดเริ่มต้น – 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm, 18 cm และ 20 cm ตามลำดับ โดยที่แต่ละระยะห่างทำการวัดค่าความต้านทานซ้ำสามครั้ง
4. บันทึกข้อมูลพร้อมหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 2.2 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่อง Digital Multimeter (UNI-T UT136B Auto Range Digital Multimeter)

วิธีการวิเคราะห์การยึดเกาะและพื้นที่ผิวของหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Stereo microscope

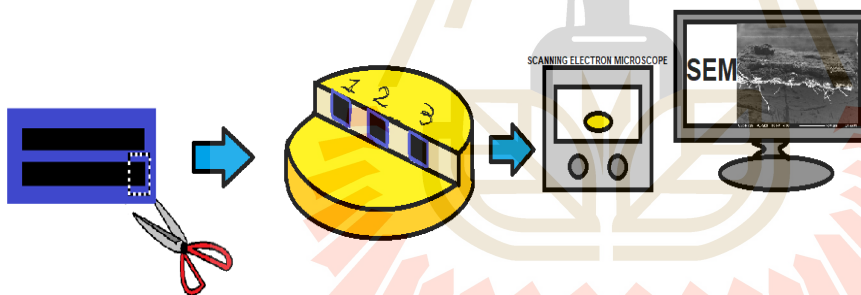
1. ตัดชิ้นผ้าที่สกรีนหมึกนำไฟฟ้าขนาด 1x1 cm
2. วางชิ้นงานลงบนกล้อง Stereo Microscope (รายละเอียดเครื่องมือวัด) จากนั้นปรับกำลังขยายไปที่กำลังขยายที่ต่ำที่สุด 1X
3. จากนั้นปรับระยะโฟกัสจนได้ภาพที่ชัดเจนที่สุด
4. ปรับกำลังขยายไปที่กำลังขยาย 5X เพื่อดูการยึดเกาะระหว่างหมึกกับผ้า (จากการทดลองปรับไปที่ 10X ทำให้เห็นการยึดเกาะไม่ชัดและแยกหมึกกับผ้ายาก)
5. ปรับระยะโฟกัสที่ทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนที่สุดอีกครั้ง แล้วกดถ่ายภาพ



รูปที่ 1.3 การวิเคราะห์การยึดเกาะและพื้นที่ผิวของหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Stereo microscope

วิธีการวัดความหนาของหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (Neo Scope JCM 5000)

1. ตัดผ้าขนาด 1 x 1 cm แล้วติดกับสตั๊ปด้วยคาร์บอนเทป
2. นำสตั๊ปชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นผ้าคอตตอนไปเคลือบทองเพราะไม่สามารถนำไฟฟ้าได้
3. เปิดเครื่อง SEM นำสตั๊ปใส่ holder แล้วล๊อค รอเครื่องทำงาน
4. ชูมกำลังขยายภาพตัวอย่างให้มากกว่ากำลังขยายที่ต้องการอย่างน้อย 2 เท่า เพื่อปรับโฟกัส จากนั้นค่อยถอยลงมาเท่ากำลังขยายที่เราต้องการ (จากการทดลองต้องการกำลังขยาย 50X)
5. ได้ภาพโฟกัสที่ชัดแล้วทำการกดถ่ายแล้วบันทึกภาพ



รูปที่ 4 การวัดความหนาของหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (Table-top (W-SEM) JEOL Neoscope JCM-5000)

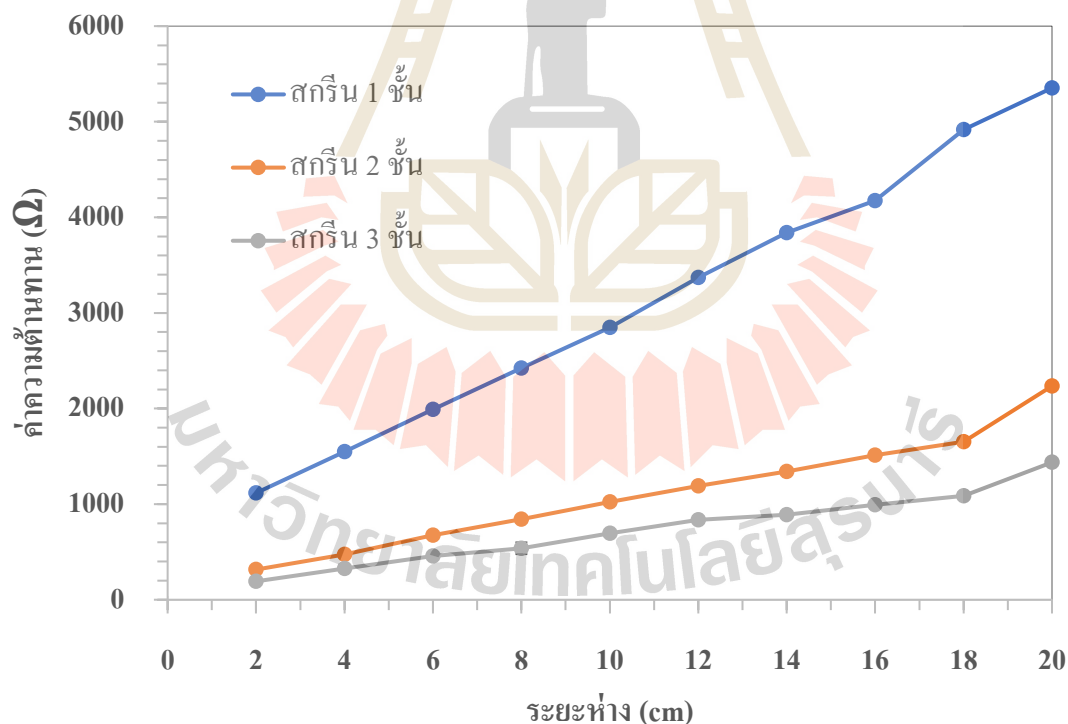
2.5 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

2.5.1 ผลของความหนาชั้นหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 ที่ได้จากการสกรีนหมึกลงบนคอตตอนต่อประสิทธิภาพของค่าความต้านทานไฟฟ้า

จากตารางที่ 2.8 นำค่าค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ทำการวัดทุกระยะ 2 cm เป็นระยะทางทั้งหมด 20 cm ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับระยะห่างทุก 2 cm จากจุดเริ่มต้นของหมึกนำไฟฟ้าที่สกรีนจำนวน 1-3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 1.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อระยะห่างจาก 0 – 20 cm ดังแสดงในกราฟรูปที่ 1.6

ตารางที่ 2.8 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าทางการค้าที่มีจำนวนชั้นที่สกรีน 1, 2 และ 3 ชั้น ตามลำดับ

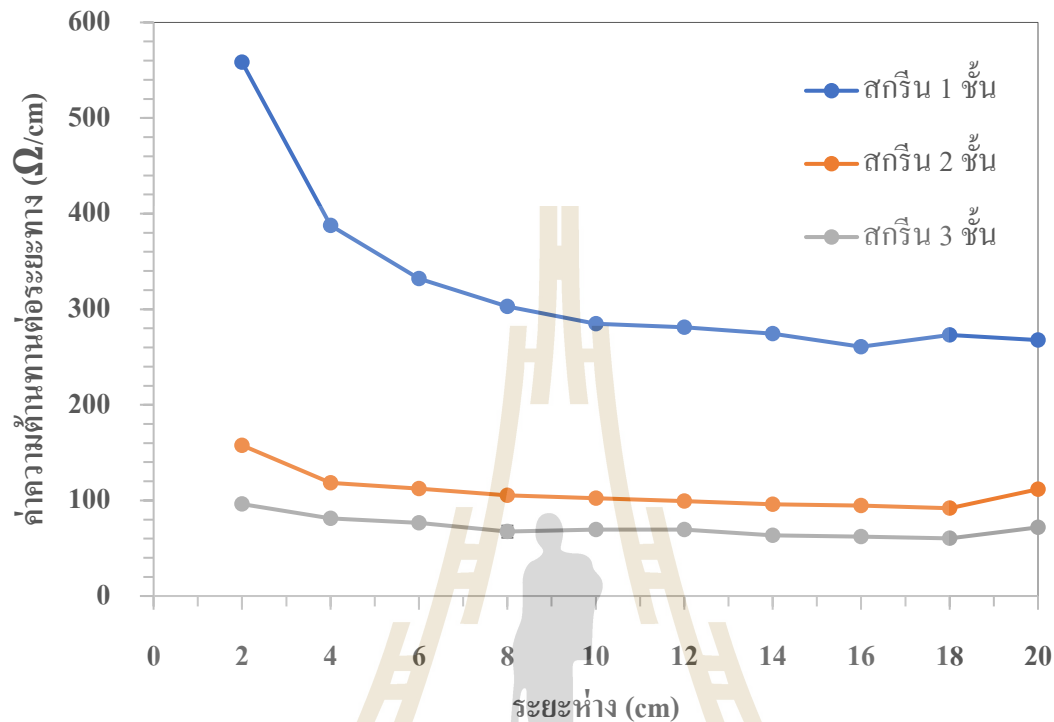
ระยะห่าง (Cm)	ค่าความต้านทาน (Ω)					
	สกรีน 1 ชั้น		สกรีน 2 ชั้น		สกรีน 3 ชั้น	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
2	1116.67	7.57	315.33	5.03	192.33	5.03
4	1550.00	14.42	473.33	6.11	325.00	3.61
6	1992.00	4.36	674.00	10.54	458.67	14.36
8	2422.67	11.24	842.67	4.51	538.67	61.23
10	2848.00	19.08	1023.67	9.29	695.67	3.51
12	3372.00	5.29	1189.67	10.41	834.33	5.13
14	3840.33	9.50	1341.00	5.29	889.33	3.51
16	4172.67	4.51	1513.67	8.14	991.67	4.16
18	4917.00	7.55	1653.00	12.77	1085.67	10.07
20	5353.33	4.51	2235.33	8.74	1437.00	15.72



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080

จากรูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับระยะห่างของหมึกที่ทำการสกรีนลงบนผ้าคอตตอน แบบ 1, 2 และ 3 ชั้น พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า มีค่าลดลง เมื่อ

จำนวนชั้นของการสกรีนเพิ่มขึ้นเป็น 1, 2 และ 3 ชั้นตามลำดับ เนื่องจากหมึกที่สกรีน 3 ชั้นมีความหนาแน่นของเนื้อหมึกมากกว่าทำให้หมึกเชื่อมต่อกันทำให้ไม่มีช่องว่างเล็ก ๆ จึงส่งผลให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ จากการทดลองนี้เราจึงทำการสกรีนหมึก 3 รอบในการทดลองต่อไป



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า

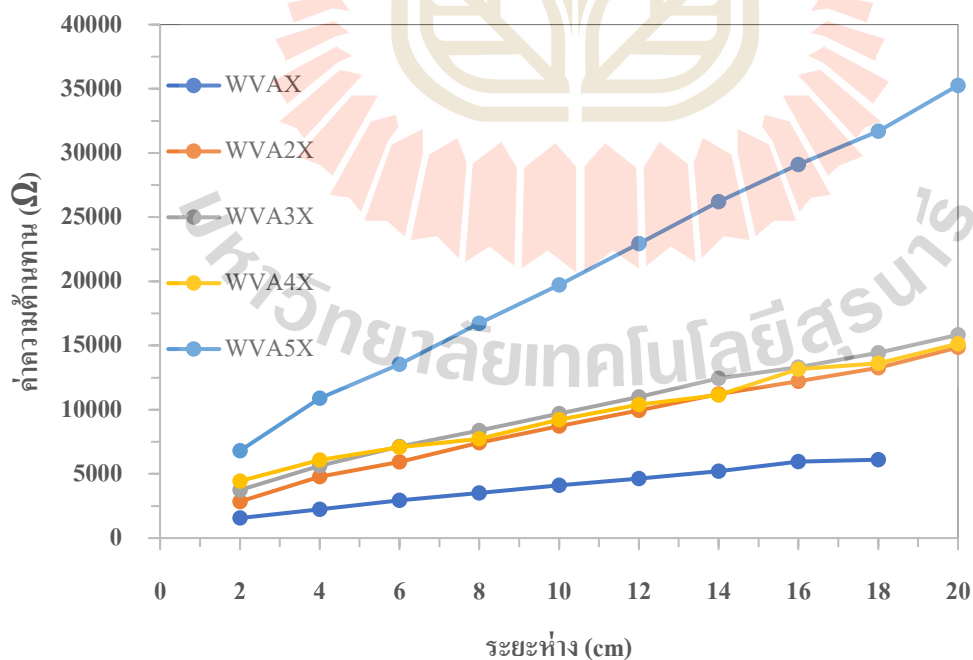
จากรูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อระยะทางของหมึกที่ทำการสกรีนลงบนผ้าคอตตอน แบบ 1, 2 และ 3 ชั้น พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ดีที่สุดคือ 3 ชั้น และเมื่อพิจารณารูปกราฟที่ 1.6 จะพบว่าในช่วง 6 - 18 cm แนวโน้มของค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกที่สกรีน 3 ชั้น จะมีค่าคงที่ และในช่วง 20 cm ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

2.5.2 ผลการศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานกลุ่มไวนิลแอลกอฮอล์ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า สูตรใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.9 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตรน้ำที่มีปริมาณตัวเชื่อมประสาน ชนิด VA ต่างๆกัน

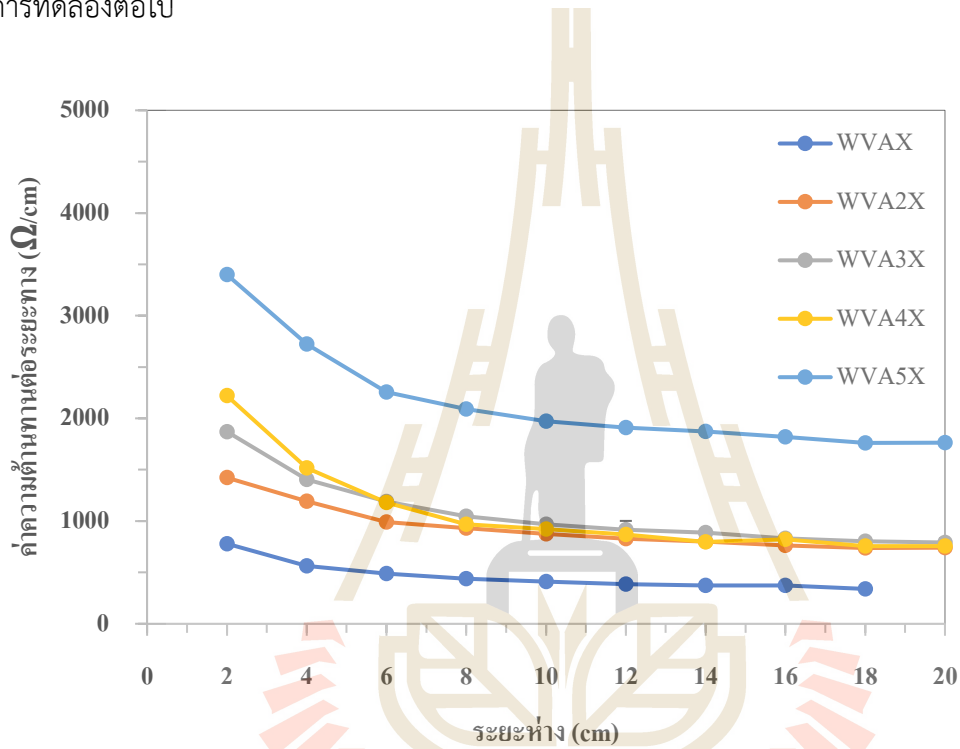
ระยะห่าง (Cm)	ค่าความต้านทาน (kΩ)									
	WVAX		WVA2X		WVA3X		WVA4X		WVA5X	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
2	1559.33	26.03	2845.33	19.55	3741.67	29.30	4441.00	69.16	6800.00	529.15
4	2252.00	22.34	4774.33	36.53	5624.67	21.03	6073.00	138.14	10900.00	173.21
6	2934.00	36.37	5939.67	16.07	7138.67	21.01	7083.67	187.19	13533.33	57.74
8	3505.00	28.62	7439.33	18.72	8366.33	22.59	7739.67	154.82	16733.33	321.46
10	4111.00	89.15	8736.67	28.68	9691.33	21.22	9219.00	68.51	19733.33	305.51
12	4640.00	11.14	9942.33	20.60	10987.00	86.19	10406.67	165.44	22933.33	288.68
14	5210.33	21.50	11221.33	24.34	12440.00	24.06	11139.33	66.15	26200.00	264.58
16	5946.67	10.69	12218.33	16.04	13317.00	24.58	13153.33	30.01	29100.00	100.00
18	6106.33	35.23	13275.67	33.86	14446.33	21.03	13610.00	170.99	31700.00	300.00
20			14847.33	51.60	15829.33	39.07	15142.33	182.23	35266.67	115.47

จากตารางที่ 2.9 นำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ทำการวัดทุกระยะ 2 cm เป็นระยะทางทั้งหมด 20 cm ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างทุก 2 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นของสารเชื่อมประสาน VA ในปริมาณ X-5X ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อระยะห่างจาก 0 – 20 cm ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA ในปริมาณ X, 2X, 3X, 4X และ 5X ตามลำดับ และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

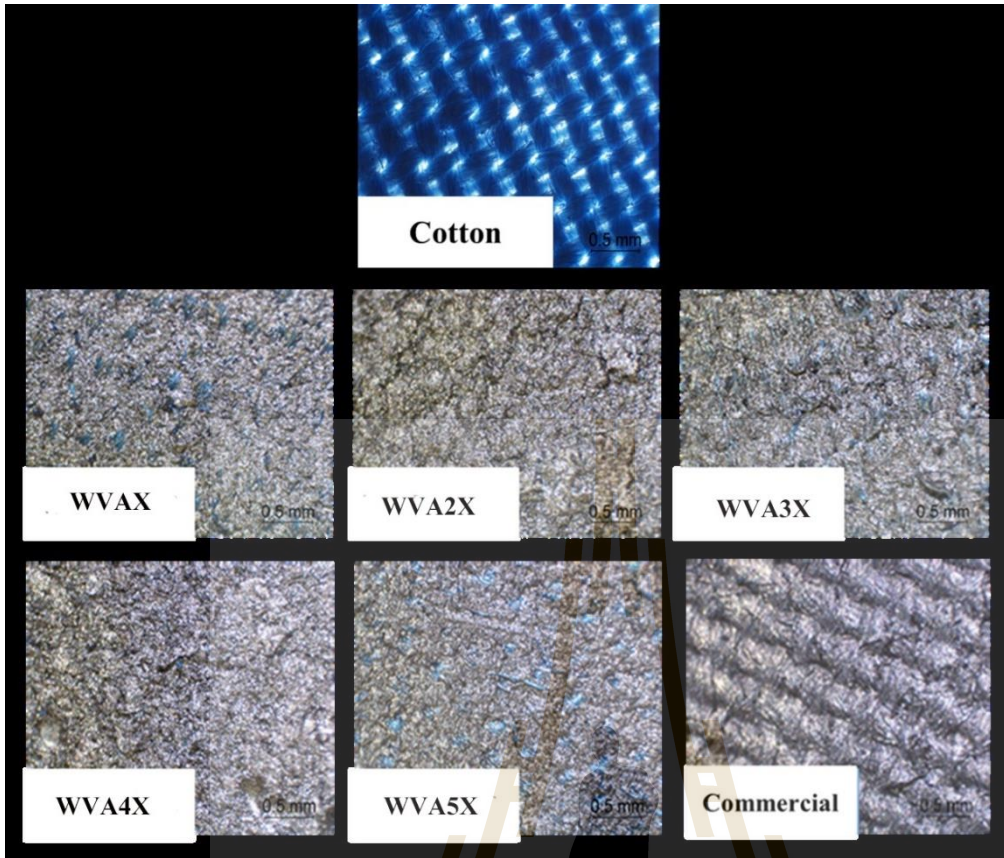
จากรูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างทุก 2 cm กับค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าหมึกนำไฟฟ้าทางการค้าโดยสูตร WVAX มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดแต่พบปัญหาคือ มีการหลุดลอกของหมึกออกมาหลังจากที่สกรีนไปแล้ว จึงได้มีการศึกษาสูตร WVA2X ซึ่งมีการเพิ่มปริมาตรตัวเชื่อมประสานและพบว่าได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้มีความใกล้เคียงกับสูตร WVA3X และสูตร WVA4X แต่ในสูตร WVA5X พบว่า มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงที่สุด ดังนั้นช่วงปริมาณสารเชื่อมประสานชนิด VA ที่เหมาะจะอยู่ในช่วงสูตรที่ WVA2X, WVA3X และ WVA4X จากผลการทดลองดังกล่าว จึงได้มีการนำสูตร WVA2X เพราะ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำและมีการยึดติดที่ดีไปใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 2.8 ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่าง 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA ในปริมาณ X, 2X, 3X, 4X และ 5X ตามลำดับ และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

จากรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่าง 2 - 20 cm กับค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเทียบกับหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางสูงกว่าหมึกนำไฟฟ้าทางการค้าโดยสูตร WVAX มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางต่ำที่สุด กราฟมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 6 - 16 cm และในช่วง 16 - 18 cm ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางมีแนวโน้มลดลงในสูตร WVA2X, WVA3X และสูตร WVA4X กราฟมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 8 - 20 cm แต่ในสูตร WVA5X กราฟมีแนวโน้มลดลงแต่ไม่คงที่ และพบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่สูงมาก

เมื่อนำตัวอย่างหมึกสกรีนประเภทต่างๆไปตรวจสอบด้วยกล้อง Optical microscope ได้ผลการตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพถ่าย Optical microscope ที่กำลังขยาย 5 เท่า ของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เคลือบบนผ้าคอตตอน โดยมีตัวเชื่อมประสานชนิด VA ในปริมาณ X, 2X, 3X, 4X และ 5X ตามลำดับ และ หมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 (Commercial)

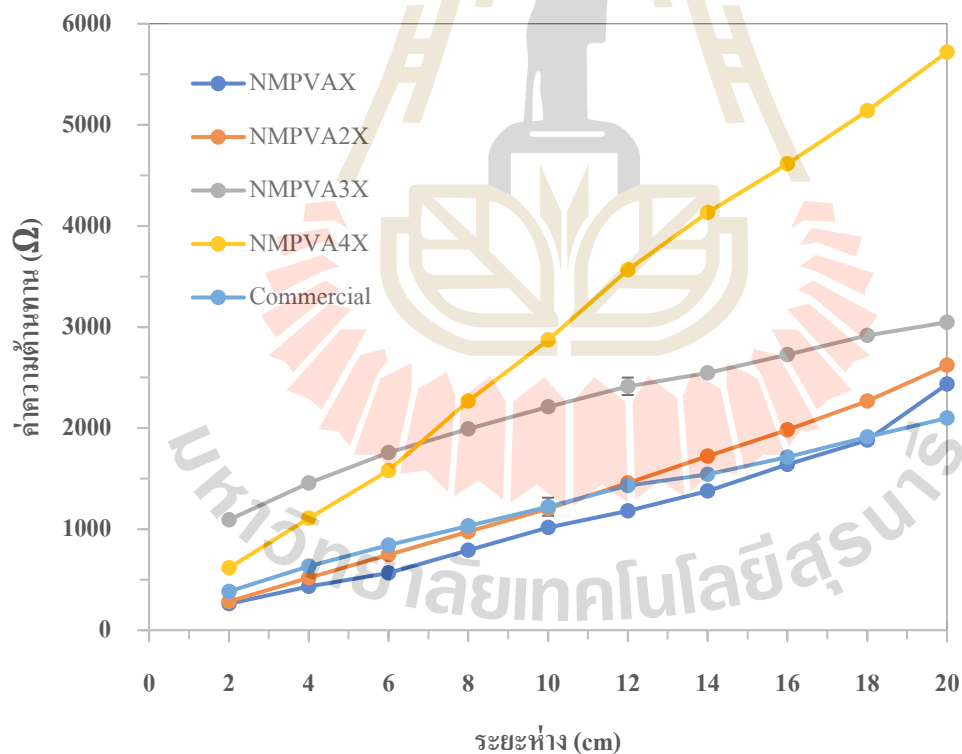
จากรูปที่ 2.9 แสดงภาพของผ้าคอตตอนที่ยังไม่ผ่านการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าเทียบกับผ้าคอตตอนที่สกรีนหมึกนำไฟฟ้าโดยที่ หมึกนำไฟฟ้าสูตร WVAX พบว่า มีเส้นใยบางส่วนของผ้าที่ไม่ถูกเคลือบด้วยหมึกนำไฟฟ้า ทำให้เห็นเส้นใยผ้าคอตตอนปรากฏออกมา และหมึกที่สกรีนมีพื้นผิวที่ไม่เรียบ หมึกนำไฟฟ้าสูตร WVA2X จะพบว่า หมึกนำไฟฟ้าสามารถเคลือบบนผิวของเส้นใยผ้าคอตตอนได้ดี ไม่มีเส้นใยที่ไม่ถูกเคลือบ แต่มีผิวเคลือบที่ไม่เรียบและจับตัวกันเป็นก้อนบนพื้นผิวผ้า หมึกนำไฟฟ้าสูตร WVA3X จะพบว่า หมึกนำไฟฟ้าสามารถเคลือบบนผิวของเส้นใยผ้าคอตตอนได้ไม่ดี สามารถเห็นเส้นใยผ้าคอตตอนที่ไม่ถูกเคลือบ มีการจับตัวกันบนผิวผ้าคอตตอน หมึกนำไฟฟ้าสูตร WVA4X จะพบว่า หมึกนำไฟฟ้าสามารถเคลือบบนผิวของเส้นใยผ้าคอตตอนได้ดี แต่มีผิวเคลือบที่ไม่เรียบ จับตัวกันเป็นก้อนหนา จนไม่สามารถมองเห็นเส้นใยผ้าคอตตอนได้ ส่วนหมึกนำไฟฟ้าสูตร WVA5X จะพบว่า หมึกนำไฟฟ้าไม่สามารถเคลือบบนผิวของผ้าคอตตอนได้หมด จากภาพสูตร WVA5X สามารถมองเห็นเส้นใยผ้าคอตตอนที่ไม่ถูกเคลือบได้

สูตรที่ใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.10 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตรใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย ที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA ปริมาณ X, 2X, 3X, 4X และ 5X ตามลำดับ

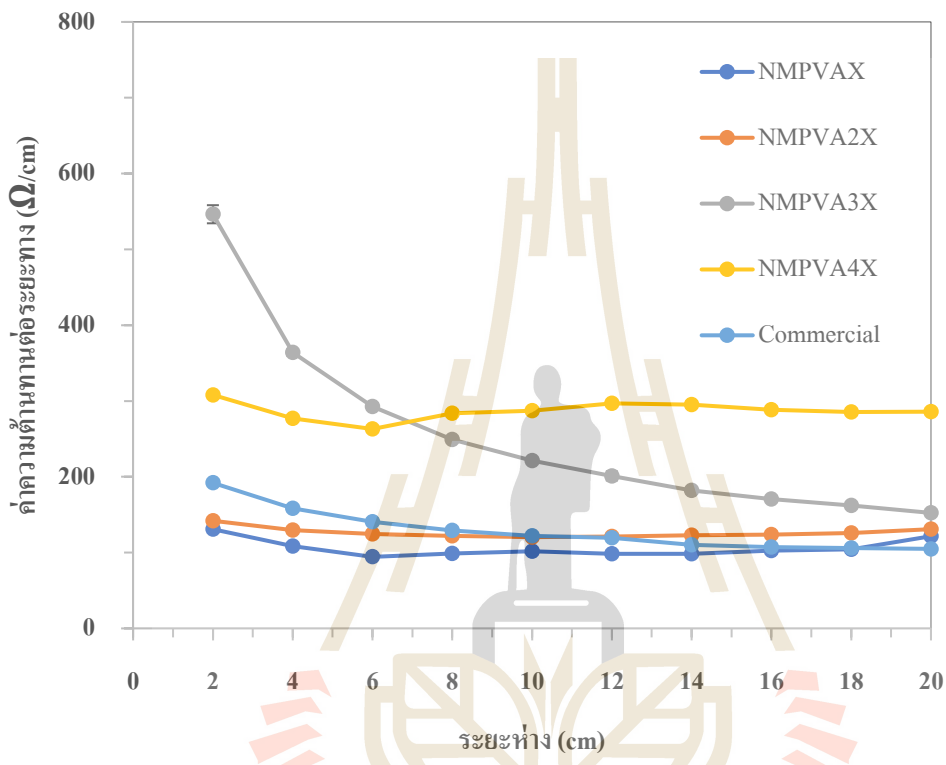
ระยะห่าง (Cm)	ค่าความต้านทาน (Ω)							
	NMPVAX		NMPVA2X		NMPVA3X		NMPVA4X	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
2	261.67	14.57	284.00	5.29	1092.67	2.52	616.00	3.00
4	433.33	5.13	518.00	7.21	1455.67	5.13	1107.67	10.79
6	566.33	7.77	747.33	6.66	1755.67	9.81	1578.33	10.60
8	790.00	5.57	974.67	2.89	1992.67	3.51	2268.67	17.62
10	1016.33	7.77	1204.33	5.13	2211.67	5.69	2872.00	8.19
12	1181.33	2.52	1455.00	4.58	2413.67	5.51	3564.33	12.50
14	1375.67	54.31	1722.00	5.29	2546.67	2.52	4131.67	10.12
16	1641.00	3.00	1982.67	5.51	2727.67	8.39	4614.00	3.61
18	1879.33	4.04	2267.67	2.08	2916.33	6.51	5140.33	9.07
20	2434.33	5.13	2620.67	4.93	3047.33	5.51	5719.33	4.04

จากตารางที่ 2.10 นำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ทำการวัดทุกระยะ 2 cm เป็นระยะทางทั้งหมด 20 cm ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะทุก 2 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด VA binder X, 2X, 3X และ 4X ตามลำดับและใช้ NMP เป็นตัวทำละลายเทียบกับหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10



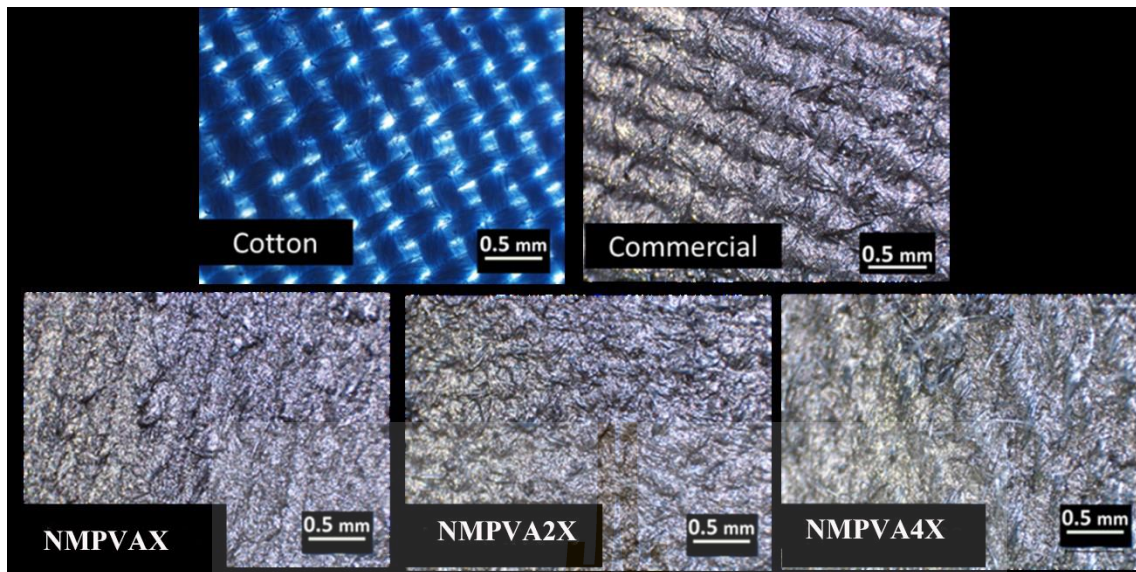
รูปที่ 2.10 ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA binder ในปริมาณ X, 2X, 3X และ 4X และใช้ NMP เป็นตัวทำละลายเทียบกับหมึกนำไฟฟ้านำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 (Commercial)

จากรูปที่ 2.10 พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า โดยสูตร NMPVAX มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดแต่พบปัญหาคือ มีการหลุดลอกของหมึกออกมาหลังจากที่สกรีนไปแล้ว เราจึงศึกษาสูตรที่ NMPVA2X, NMPVA3X ซึ่งมีการเพิ่มสารยึดเกาะ พบว่า สูตร NMPVA2X มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ใกล้เคียงหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า และในสูตร NMPVA4X พบว่า ยังมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูง จากผลการทดลองดังกล่าว จึงได้นำสูตร NMPVA2X เพราะ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ และมีการยึดเกาะที่ดีไปใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 2.11 ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด PVA binder ในปริมาณ X, 2X, 3X และ 4X และใช้ NMP เป็นตัวทำละลายเทียบกับหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 (Commercial)

จากรูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่าง 2 - 20 cm กับค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเทียบกับหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า พบว่าสูตร NMPVAX และสูตร NMPVA2X มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ใกล้เคียงกับหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า โดยสูตร NMPVAX มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางต่ำที่สุด โดยกราฟของสูตร NMPVAX และสูตร NMPVA2X มีแนวโน้มคงที่ในช่วง 4 - 20 cm ในสูตร NMPVA3X พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นที่ระยะห่าง 2 cm มีค่าที่สูงกว่าสูตรการทดลองอื่น และมีแนวโน้มลดลงตามระยะห่างของจุด และสูตร NMPVA4X ในช่วง 8 -20 cm มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่คงที่



รูปที่ 2.12 ภาพถ่าย Optical microscope ที่กำลังขยาย 5 เท่า ของหมึกนำไฟฟ้าที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เคลือบบนผ้าคอตตอน โดยมีตัวเชื่อมประสานชนิด PVA binder ในปริมาณต่างกัน

จากรูปที่ 2.12 แสดงภาพของผ้าคอตตอนที่ยังไม่ผ่านการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าเทียบกับผ้าคอตตอนที่สกรีนหมึกนำไฟฟ้าโดยที่ หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMPVAX พบว่า ผ้าคอตตอนถูกเคลือบด้วยหมึกนำไฟฟ้าที่หนาและไม่มีเส้นใยผ้าปรากฏออกมาส่งผลให้มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMPVA2X จะพบว่า หมึกนำไฟฟ้าสามารถเคลือบบนผิวของเส้นใยผ้าคอตตอนได้ดี ไม่ปรากฏส่วนของเส้นใยผ้าคอตตอนออกมา แต่เนื้อพื้นผิวของหมึกที่สกรีนได้มีผิวไม่เรียบ หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMPVA4X พบว่า มีพื้นผิวผ้าคอตตอนบางส่วนที่หมึกนำไฟฟ้าไม่สามารถเคลือบบนพื้นผ้าได้ ส่งผลให้ผิวเคลือบมีความบาง เนื่องจากการใส่ VA ลงไปในหมึกนำไฟฟ้าในปริมาณที่มากเกินไปทำให้เกิดความหนืดมาก ส่งผลให้เมื่อสกรีนลงบนผ้าคอตตอนแล้วไม่เกิดการยึดเกาะบนพื้นผิวผ้า

2.5.3 ผลของชนิดตัวเชื่อมประสานต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และหมึกนำไฟฟ้าที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

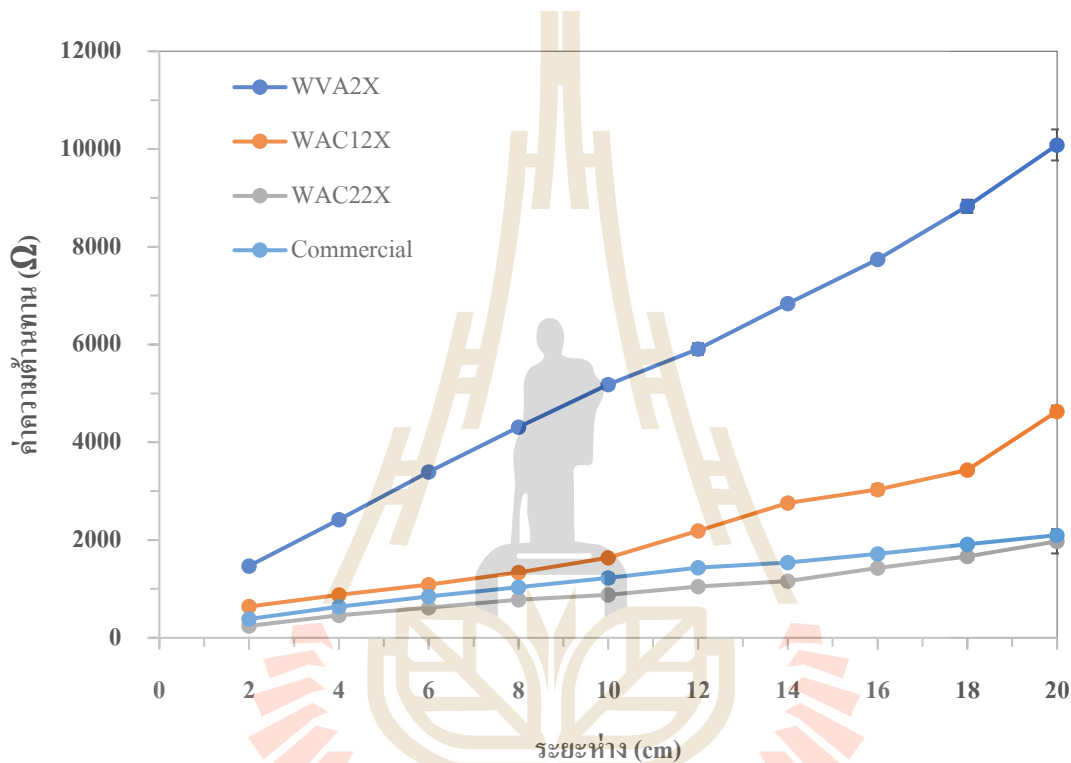
สูตรที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.11 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตรใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA , AC₁ และ AC₂ ปริมาณ 2X เท่ากัน โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

ระยะห่าง (Cm)	ค่าความต้านทาน (Ω)					
	WVA2X		WAC ₁ 2X		WAC ₂ 2X	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
2	1470.00	60.83	640	60.00	243.33	28.87
4	2420.00	81.85	880	17.32	460.00	52.92
6	3393.33	86.22	1086.667	11.55	613.33	5.77
8	4310.00	52.92	1333.333	15.28	780.00	17.32
10	5183.33	89.63	1640	10.00	880.00	10.00
12	5906.67	119.30	2186.667	15.28	1046.67	5.77

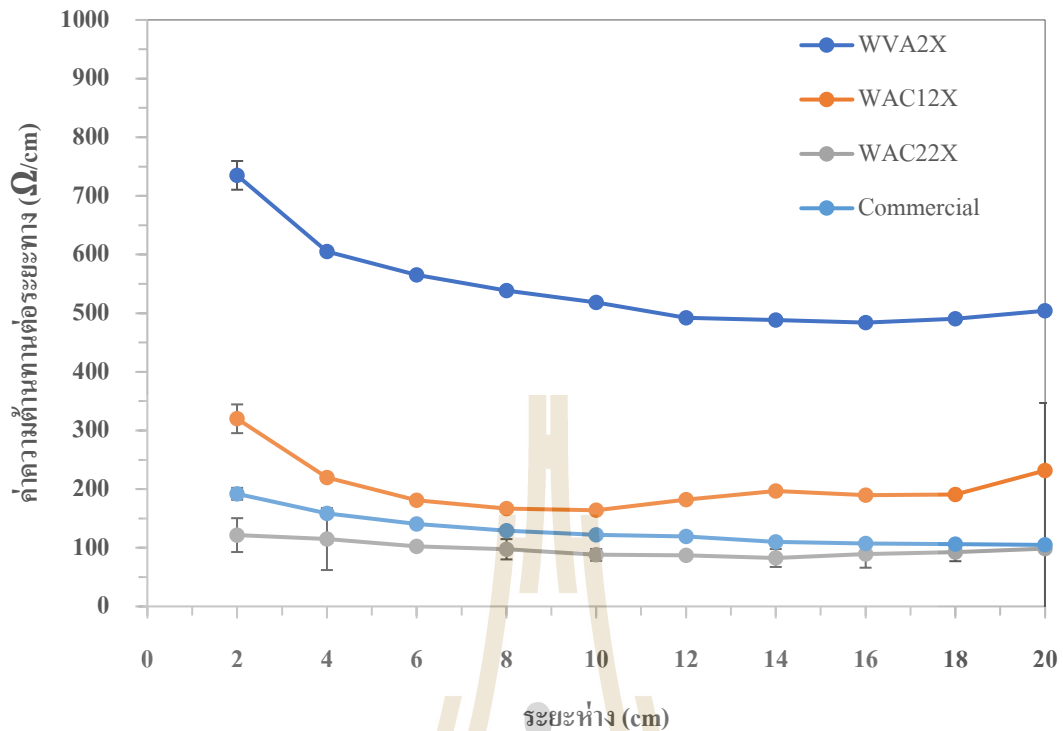
14	6836.67	75.06	2756.667	70.24	1156.67	15.28
16	7743.33	68.07	3033.333	102.14	1426.67	23.09
18	8826.67	134.29	3433.333	49.33	1663.33	15.28
20	10083.33	317.70	4633.333	115.90	1973.33	248.26

จากตารางที่ 2.11 นำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ทำการวัดทุกระยะ 2 cm เป็นระยะทางทั้งหมด 20 cm ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับระยะห่างทุก 2 cm จากจุดเริ่มต้นของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้สารยึดเกาะชนิดที่แตกต่างกัน และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.13



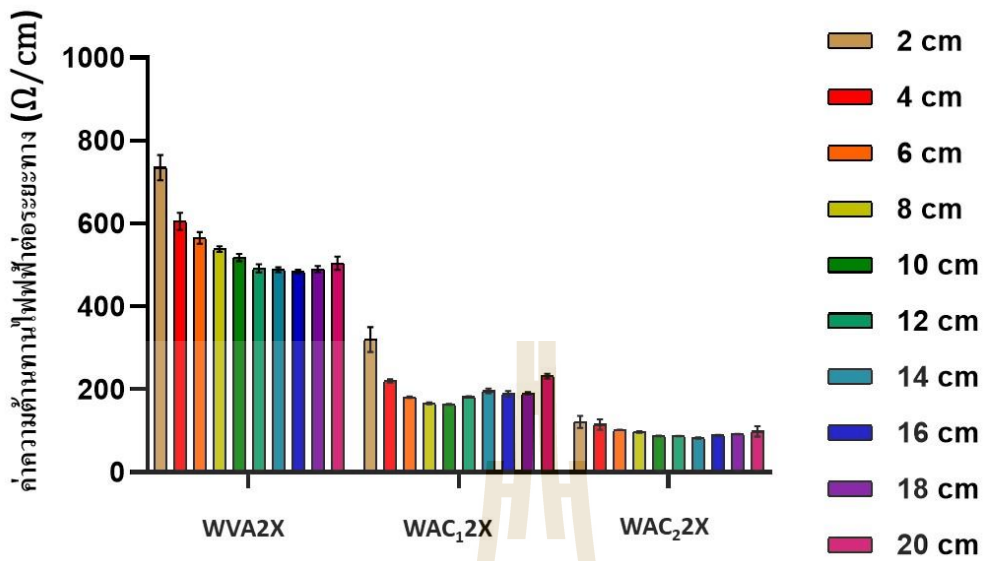
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA , AC1 และ AC2 ปริมาณ 2X และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เทียบกับหมึกนำไฟฟ้า Haydale SYNERG Graphene Ink P080 (Commercial)

จากรูปที่ 2.13 พบว่ามีค่าความต้านทานสูงกว่าหมึกทางการค้า โดยหมึกนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มีความใกล้เคียงกับหมึกทางการค้ามากที่สุดคือ หมึกนำไฟฟ้าสูตร WAC₂X ส่วนหมึกสูตร WAC₁X มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าสูตร WAC₂X และที่ระยะห่างหลังจาก 10 Cm มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ไม่คงที่ และสูตร WVA2X มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงมากถึง 10,000 โอห์ม



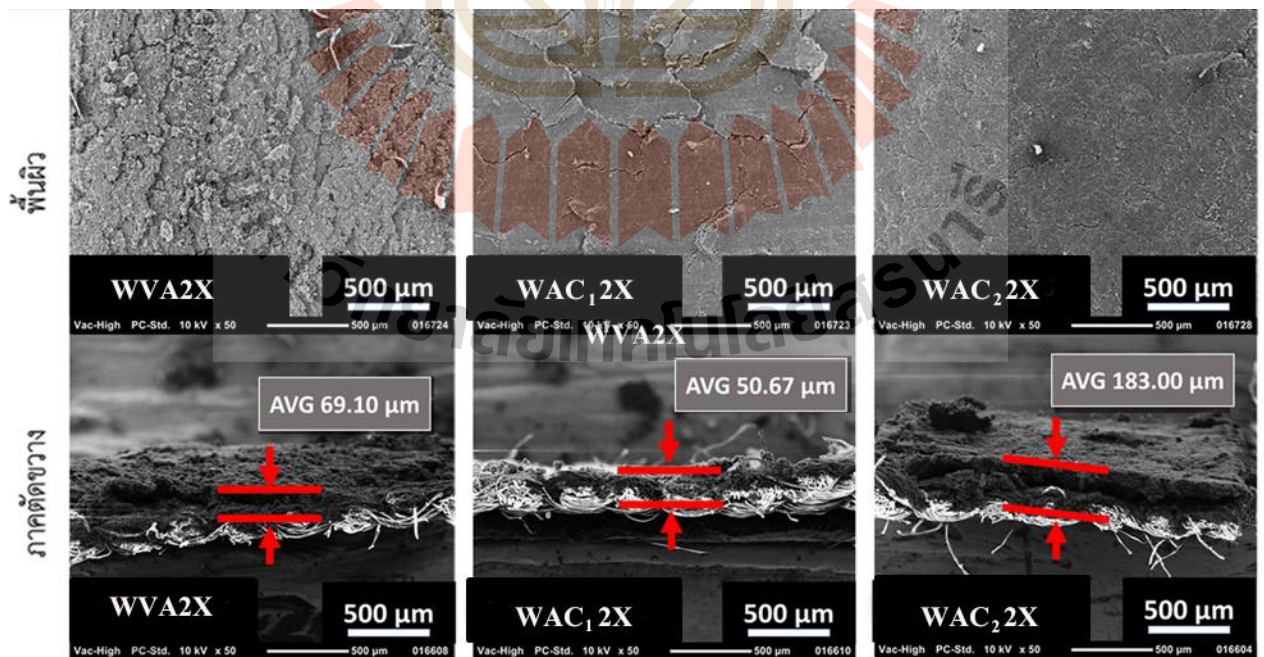
รูปที่ 2.14 ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่อระยะทางที่ระยะห่าง 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด WVA, WAC₁ และ WAC₂ ปริมาณ 2X และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

จากรูปที่ 2.14 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่าง 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสาน VA, AC₁ และ AC₂ ปริมาณ 2X และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย พบว่า สูตร WVA2X มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางสูงที่สุดและมีแนวโน้มของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ลดลง ในสูตร WAC₁2X พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางต่ำกว่าสูตร WVA2X แต่มีแนวโน้มของกราฟที่ไม่คงที่ และในสูตร WAC₂2X พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางต่ำกว่าหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า ซึ่งมีแนวโน้มของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางคงที่และใกล้เคียงกันกับหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า



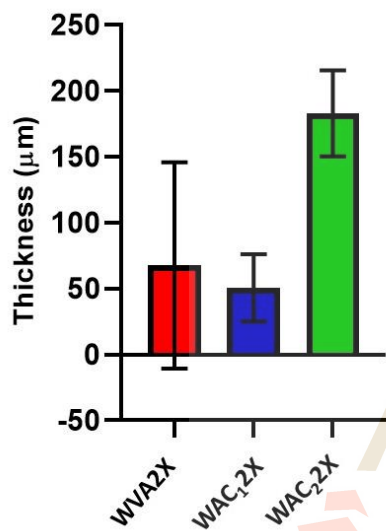
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางเทียบกับปริมาณ 2X ของสูตรที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและมีตัวเชื่อมประสานชนิด VA, AC₁ และ AC₂

จากรูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางเทียบกับปริมาณ 2X ของสูตรที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและมีตัวเชื่อมประสานชนิด VA, AC₁ และ AC₂ พบว่า สูตรที่ใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด VA ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงสุด และสูตรที่ใช้ ตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด



รูปที่ 2.16 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า ของหมึกนำไฟฟ้าใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่เคลือบบนผ้าคอตตอนโดยมีตัวเชื่อมประสานชนิดที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 2.16 หมึกนำไฟฟ้าสูตร WVA2X พบว่า หมึกเคลือบพื้นผิวของผ้าได้ทั้งหมด หมึกนำไฟฟ้าสามารถซึมเข้าไปในเส้นใยผ้าได้ค่อนข้างดี แต่ผิวของหมึกนำไฟฟ้ามีรอยแตกเล็กๆ ไม่เรียบ และจับตัวกันบนเนื้อผ้าซึ่งพื้นผิวหมึกมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 69.10 μm หมึกนำไฟฟ้าสูตร WAC₁2X พบว่า ลักษณะพื้นผิวของหมึกมีความเรียบ หมึกนำไฟฟ้าสามารถซึมเข้าเส้นใยผ้าคอตตอนได้ดีและพื้นผิวหมึกมีความบางมาก ซึ่งความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 50.67 μm แต่ผิวเกิดรอยแตกกร้าวและนูนขึ้นจากผิวหมึก หมึกนำไฟฟ้าสูตร WAC₂2X พบว่า มีลักษณะพื้นผิวหน้าที่ยเรียบ ไม่มีรอยแตก หมึกนำไฟฟ้าสามารถซึมเข้าสู่เส้นใยผ้าคอตตอนได้ไม่มาก ตัวหมึกมีการเกาะตัวเป็นแผ่นหนายู่ด้านบนเนื้อผ้าคอตตอนซึ่งความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 183 μm



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความหนาของหมึกนำไฟฟ้าใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่เคลือบบนผ้าคอตตอนโดยมีตัวเชื่อมประสานชนิดที่แตกต่างกัน

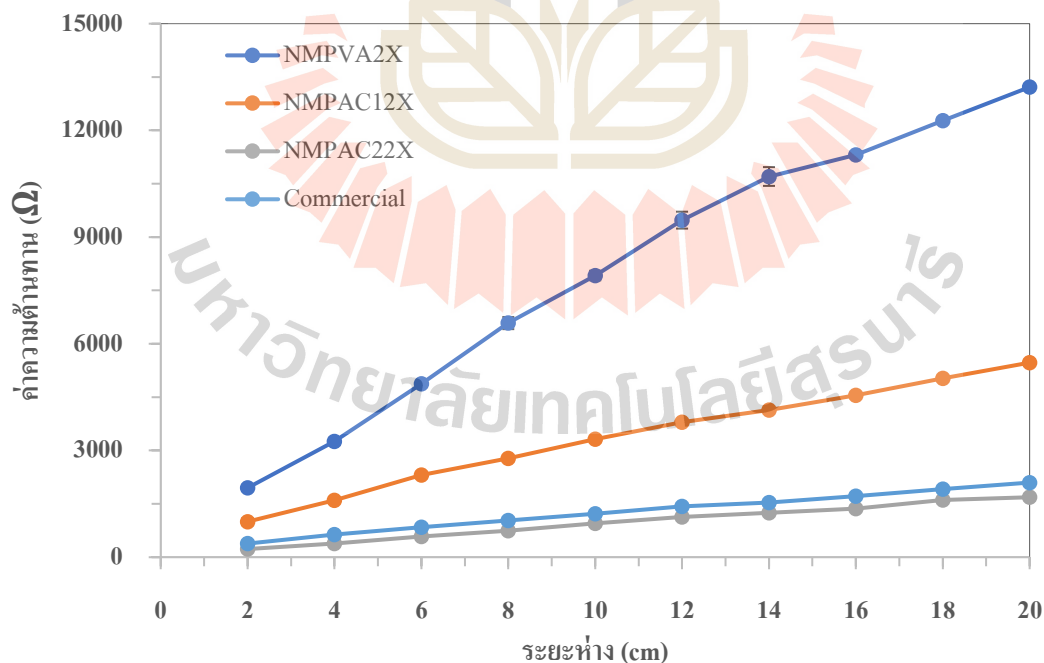
จากรูปที่ 2.17 แสดงความหนาของหมึกนำไฟฟ้าใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่เคลือบบนผ้าคอตตอนโดยมีตัวเชื่อมประสานชนิดที่แตกต่างกัน พบว่าหมึกนำไฟฟ้าสูตร WAC₂2X มีความหนามากกว่าสูตร WVA2X และสูตร WAC₁2X จึงทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของสูตร WAC₂2X ลดลง

สูตรที่ NMP เป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.12 ค่าความต้านทานที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตร non-water base ที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด VA, AC₁ และ AC₂ ปริมาณ 2X เท่ากัน โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

ระยะห่าง (Cm)	ค่าความต้านทาน (Ω)					
	NMPVA2X		NMPAC ₁ 2X		NMPAC ₂ 2X	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
2	1950.00	81.85	1000.00	100.00	230.00	10.00
4	3256.67	105.99	1596.67	64.29	386.67	15.28
6	4873.33	81.45	2310.00	45.83	586.67	11.55
8	6583.33	170.98	2783.33	30.55	746.67	41.63
10	7920.00	134.54	3323.33	47.26	950.00	26.46
12	9476.67	237.56	3800.00	20.00	1130.00	0.00
14	10703.33	263.88	4136.67	32.15	1253.33	25.17
16	11313.33	61.10	4553.33	40.41	1370.00	10.00
18	12273.33	75.72	5033.33	41.63	1613.33	25.17
20	13216.67	51.32	5470.00	60.00	1686.67	11.55

จากตารางที่ 2.12 นำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ทำการวัดทุกระยะ 2 cm เป็นระยะทางทั้งหมด 20 cm ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระยะห่างทุกๆ 2 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด VA , AC₁ และ AC₂ ที่ปริมาณ 2X เท่ากัน และใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด NMPVA, NMPAC₁ และ NMPAC₂ ปริมาณ 2X และไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

จากรูปที่ 2.18 พบว่า สูตร NMPVA2X, NMPAC₁2X และ NMPAC₂2X ซึ่งมีการเติมตัวเชื่อมประสาน ในปริมาณ 2X เท่ากัน แต่เป็นตัวเชื่อมประสานต่างชนิดกัน ซึ่งได้ค่าความต้านทานไฟฟ้า ที่ต่างกันมาก จากกราฟ จะเห็นว่าสูตร NMPVA2X มีค่า resistance ที่สูงมากกว่า 12,000 โอห์ม ในสูตร NMPAC₁2X ซึ่งมีค่า resistance มากกว่า 4,000 โอห์ม ส่วนสูตร NMPAC₂2X มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าหมึกนำไฟฟ้าทางการค้าที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงถึง 2,000 โอห์ม และสูตร NMPAC₂2X นี้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงสุดไม่ถึง 2000 โอห์ม ซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในการทดลองนี้ แต่ก็พบปัญหาเรื่องการยึดเกาะของหมึกบนผ้าคอตตอนหลังจากที่นำไปอบ

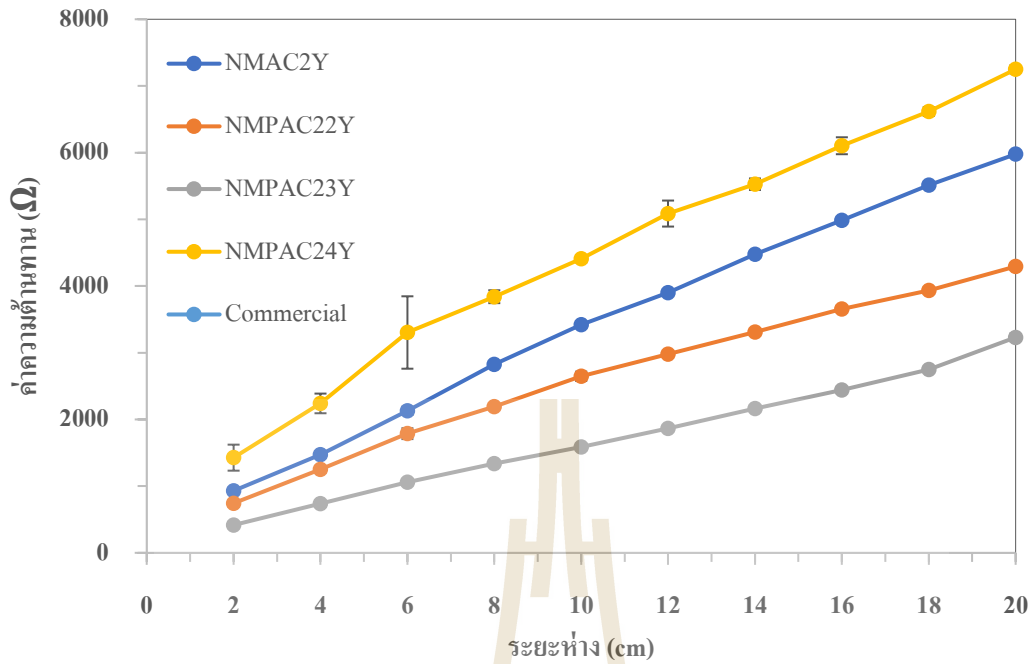
จากผลการทดลองดังกล่าว เราจึงนำสูตร NMPAC₂2X เพราะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ แต่มีการยึดเกาะที่ยังไม่ดีขึ้นไปใช้ในการทดลองต่อไป เพื่อศึกษาว่าปริมาณสารเชื่อมประสาน AC₂ ที่เท่าไรจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ และ มีการยึดเกาะที่ดีที่สุด

2.5.4 ผลการศึกษาผลของปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า

ตารางที่ 2.13 ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่าง 0 – 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าสูตร non water base ที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด PVA binder , Acrylic binder และ Bronze binder ปริมาณ 0.16 g เท่ากัน โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

ระยะห่าง (Cm)	ค่าความต้านทาน (Ω)							
	NMPAC ₂ Y		NMPAC ₂ 2Y		NMPAC ₂ 3Y		NMPAC ₂ 4Y	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
2	930.00	26.46	743.33	45.09	416.67	15.28	1426.67	195.02
4	1470.00	43.59	1253.33	50.33	736.67	20.82	2240.00	147.31
6	2130.00	62.45	1786.67	81.45	1056.67	25.17	3303.33	542.80
8	2823.33	15.28	2190.00	20.00	1336.67	25.17	3840.00	96.44
10	3420.00	20.00	2646.67	70.24	1586.67	20.82	4410.00	55.68
12	3900.00	10.00	2980.00	30.00	1863.33	15.28	5086.67	195.02
14	4476.67	28.87	3310.00	30.00	2163.33	20.82	5526.67	86.22
16	4983.33	15.28	3653.33	45.09	2440.00	30.00	6103.33	127.02
18	5513.33	15.28	3933.33	40.41	2750.00	10.00	6616.67	66.58
20	5976.67	25.17	4293.33	15.28	3230.00	60.83	7250.00	62.45

จากตารางที่ 2.13 นำค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ทำการวัดทุกระยะ 2 cm กับค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่มีตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ในปริมาณ Y, 2Y, 3Y และ 4Y ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังแสดงรูปที่ 2.19

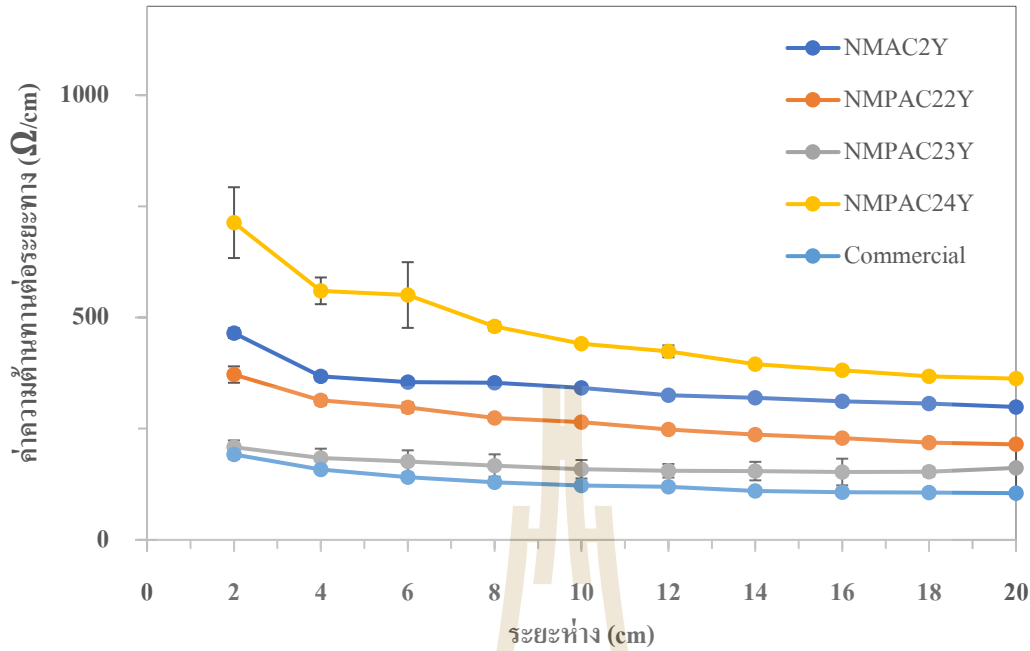


รูปที่ 2.19 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นที่ระยะ 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ในปริมาณต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างทุก 2 cm กับค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ต่างกัน พบว่า ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าหมึกนำไฟฟ้าทางการค้า ซึ่งสูตรที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สารยึดเกาะชนิด AC₂ คือ หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂3Y อาจเนื่องมาจาก หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂3Y สามารถเคลือบติดบนผ้าคอตตอนได้ดี จนไม่สามารถเห็นเส้นใยผ้าได้ (ดังแสดงในรูปที่ 43) จึงทำให้ไม่เกิดระยะห่างระหว่างตัวหมึกนำไฟฟ้า ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกมีค่าที่ต่ำกว่า 3,000 โอห์ม

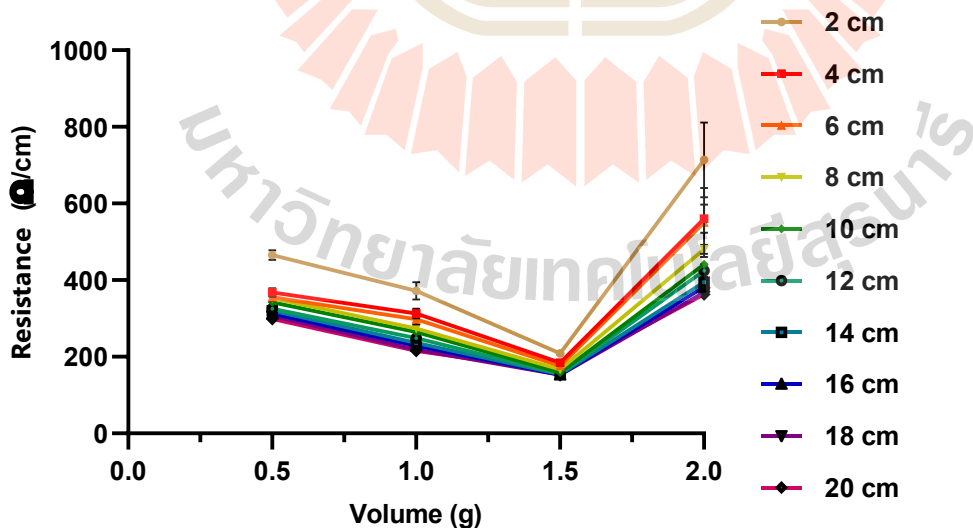
ส่วนหมึกนำไฟฟ้าที่มีปริมาณ AC₂ ต่ำเกินไป จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงถึง 3,000 - 4,000 โอห์ม เช่น หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂Y และ หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂2Y เนื่องจากมีปริมาณสารยึดเกาะที่ไม่เพียงพอทำให้หมึกจับตัวกันไม่ดี ดังแสดงในรูปที่ 1.23 ของหมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂Y และหมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂2Y จะเห็นว่าเส้นใยของผ้าคอตตอนที่ไม่ถูกเคลือบปรากฏออกมา แต่เมื่อใช้ปริมาณ AC₂ มากขึ้น ปัญหาที่เกิดขึ้นคือมีค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าที่สูงขึ้น เช่นในสูตร NMP AC₂4Y ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงมากถึง 7,000 โอห์ม

เนื่องจากขั้นตอนการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ความเข้มข้นของ AC₂ ที่ต่างกันนี้ อาจไม่ได้ควบคุมจำนวนรอบการสกรีนหมึกที่เท่ากัน จึงอาจมีส่วนที่จะทำให้ค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้ากลุ่มนี้มีค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ควรจะเป็น



รูปที่ 2.20 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่าง 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC_2 ในปริมาณ Y, 2Y, 3Y และ 4Y โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า

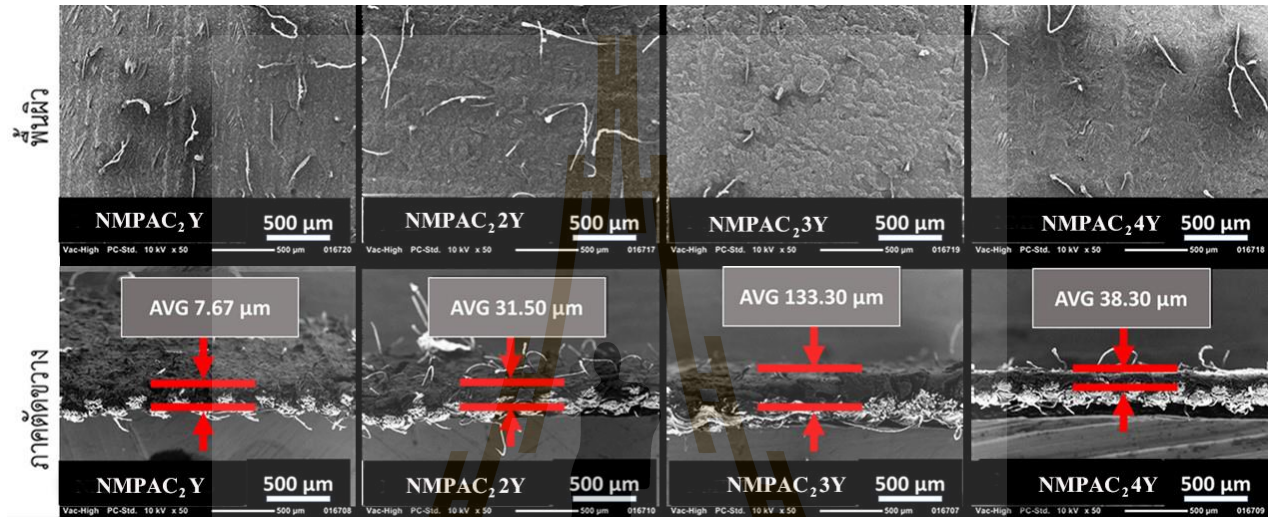
จากรูปที่ 2.20 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ระยะห่าง 2 - 20 cm ของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC_2 ในปริมาณ Y, 2Y, 3Y และ 4Y และใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย พบว่าสูตร $NMPAC_24Y$ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางสูงที่สุดและมีแนวโน้มของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ลดลง ในสูตร $NMPAC_2Y$, $NMPAC_22Y$ และ $NMPAC_23Y$ พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางลดลงตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มของกราฟคงที่ที่ระยะ 6 - 20 cm



รูปที่ 2.21 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางที่ยับกับปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด AC_2 โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

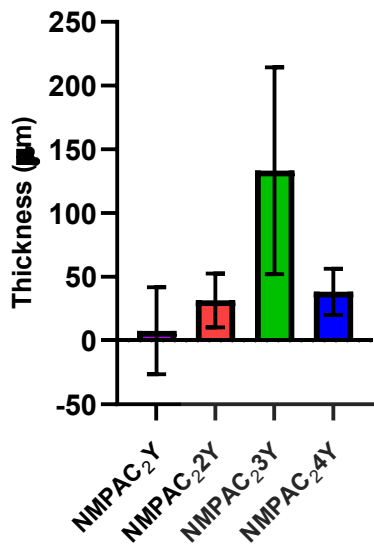
จากรูปที่ 2.21 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อระยะทางเทียบกับปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย พบว่า ปริมาณ AC₂ ที่ 3Y มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดแต่เมื่อปริมาณ AC₂ เพิ่มสูงขึ้นเกิน 3Y จะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น

เนื่องจากขั้นตอนการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้ความเข้มข้นของ AC₂ ที่ต่างกันนี้ ทำให้หมึกมีความหนืดที่ต่างกัน จึงไม่สามารถควบคุมจำนวนรอบการสกรีนหมึกที่เท่ากันได้ ส่งผลให้หมึกมีความหนาที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.22 และ รูปที่ 2.23 ซึ่งอาจมีส่วนที่จะทำให้อาจมีค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้ากลุ่มนี้มีค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ควรจะเป็น



รูปที่ 2.22 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า ของหมึกนำไฟฟ้าที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเคลือบบนผ้าคอตตอน โดยมีตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ในปริมาณต่างกัน

จากรูปที่ 2.22 พบว่าหมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂Y พบว่า มีลักษณะพื้นผิวหน้าที่เรียบ ไม่มีรอยแตก มีรูพรุนเล็กน้อย หมึกนำไฟฟ้าสามารถซึมเข้าสู่เส้นใยผ้าคอตตอนได้ดีมากจะเห็นว่าความหนาเฉลี่ยที่ 7.67 μm เนื่องจาก เมื่อนำค่าเฉลี่ยของหมึกที่รวมกับความหนาเฉลี่ยของผ้าคอตตอนแล้วนำมาลบกับความหนาเฉลี่ยของผ้า cotton จะได้ค่าความหนาของหมึก ซึ่งค่าความหนาเฉลี่ยของของผิวหมึกในสูตรนี้น้อยกว่าทุกสูตร แสดงว่าหมึกมีความหนาน้อยกว่าผ้าคอตตอนหรือหมึกมีความสามารถในการซึมเข้าสู่เส้นใยผ้าคอตตอนได้ดีมากแต่ก็ยังมีเส้นใยผ้าคอตตอนหลุดออกมาจากตัวผิวหน้าหมึกจำนวนมาก หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂2Y พบว่า มีลักษณะพื้นผิวหน้าที่ขรุขระเล็กน้อย ไม่มีรอยแตก หมึกนำไฟฟ้าไม่สามารถซึมเข้าสู่เส้นใยผ้าคอตตอนได้ดี มีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 31.50 μm และมีเส้นใยผ้าคอตตอนหลุดออกมาจากตัวผิวหน้าหมึกจำนวนมาก หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂3Y พบว่า มีลักษณะพื้นผิวหน้าที่ขรุขระ ไม่มีรอยแตก หมึกนำไฟฟ้าสามารถซึมเข้าสู่เส้นใยผ้าคอตตอนได้เล็กน้อยมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 133.30 μm มีเส้นใยผ้าคอตตอนหลุดออกมาจากผิวหน้าหมึกเล็กน้อย หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMP AC₂4Y พบว่า มีลักษณะพื้นผิวหน้าที่ค่อนข้างเรียบเมื่อเทียบกับหมึกนำไฟฟ้าสูตรที่ผ่านมา ไม่มีรอยแตก หมึกนำไฟฟ้าสามารถซึมเข้าสู่เส้นใยผ้าคอตตอนได้เล็กน้อยมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 38.30 μm และมีเส้นใยผ้าคอตตอนหลุดออกมาจากตัวผิวหน้าหมึกเล็กน้อย



รูปที่ 2.23 ความหนาของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด Bronze binder โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย

จากรูปที่ 2.23 แสดงความหนาของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย พบว่า หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMPAC₂3Y มีความหนามากกว่าสูตร NMPAC₂Y, NMPAC₂2Y และ สูตร NMPAC₂4Y ซึ่งสูตร NMPAC₂Y แต่มีความหนาต่ำสุด

2.6 สรุปผลการทดลองตอนที่ 1

1. ผลจากการศึกษาจำนวนชั้นของหมึกนำไฟฟ้าทางการค้าต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า ที่สกรีนบนผ้า คอตตอนวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่อง Digital Multimeter (UNI-T UT136B Auto Range Digital Multimeter) จากการทดลองสรุปได้ว่า หมึกที่สกรีน 3 รอบ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด มีค่าเริ่มต้น 192 โอห์ม และระยะสุดท้าย 1,437 โอห์ม จากการทดลองนี้เราทราบว่าความหนาของชั้นหมึกเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าความต้านทานลดลง ดังนั้นเราจึงจะทำการสกรีนหมึกแบบ 3 รอบ ในขั้นตอนการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าที่เราจะทำขึ้นเองเพื่อมาใช้แทนหมึกทางการค้า

2. ผลจากการศึกษาปริมาณตัวเชื่อมประสานชนิด VA ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าทำการเตรียมหมึก 2 ประเภท ได้แก่ หมึกนำไฟฟ้าชนิดใช้น้ำ DI เป็นตัวทำละลาย และ ชนิดใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่อง Digital Multimeter (UNI-T UT136B Auto Range Digital Multimeter) จากการทดลองสรุปได้ว่า หมึกนำไฟฟ้าชนิดใช้น้ำ DI เป็นตัวทำละลายในสูตร WVAX มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ใกล้เคียงหมึกทางการค้ามากที่สุด โดยมีค่าความต้านทานเริ่มต้นที่ 1,559.33 โอห์ม และสูงสุดที่ 6106.33 โอห์ม แต่ยังมีปัญหาที่มีการหลุดลอกของพื้นผิวหมึกหลังจากสกรีนไปแล้ว และ หมึกนำไฟฟ้าชนิดใช้ NMP เป็นตัวทำละลายในสูตร WVAX มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าหมึกทางการค้า โดยมีค่าความต้านทานเริ่มต้น 261.67 โอห์มและสูงสุดที่ 2,434.33 โอห์ม แต่ก็ยังมีปัญหาที่มีการหลุดลอกของพื้นผิวหมึกหลังจากสกรีนไปแล้ว และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเชื่อมประสาน VA ก็จะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น

3. ผลของการศึกษาชนิดตัวเชื่อมประสาน VA, AC₁ และ AC₂ ต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า จะทำการเตรียมหมึก 2 ประเภท ได้แก่ หมึกนำไฟฟ้าชนิดใช้น้ำ DI เป็นตัวทำละลายและชนิดใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่อง Digital Multimeter (UNI-T UT136B Auto Range Digital

Multimeter) จากการทดลองสรุปได้ว่า หมึกนำไฟฟ้าชนิดใช้น้ำ DI เป็นตัวทำละลายและ Bronze เป็นตัวเชื่อมประสาน ในสูตร WAC₂2X มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าหมึกทางการค้ามากที่สุด โดยมีค่าความต้านทานเริ่มต้นที่ 243.33 โอห์ม และสูงสุดที่ 1,973.33 โอห์ม ความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 0.15 mm และหมึกนำไฟฟ้าชนิดใช้น้ำ NMP เป็นตัวทำละลายและ AC₂ เป็นตัวเชื่อมประสาน ในสูตร NMPAC₂2X มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าหมึกทางการค้า โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 230 โอห์ม และสูงสุดที่ 1,686.67 โอห์ม ซึ่งมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 0.02 mm แต่ก็ยังพบปัญหาที่มีการหลุดลอกของพื้นผิวหมึกหลังจากสกรีนไปแล้วทั้งสองสูตร จากผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกันพบว่าในสูตรที่ใช้น้ำและไมใช้น้ำเป็นตัวทำละลายสูตรที่ใช้ตัวเชื่อมประสาน AC₂ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด

4. ผลจากการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC₂ ในปริมาณที่ Y-4Y โดยใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย จากการทดลองสรุปได้ว่า ค่าความต้านทานของตัวเชื่อมประสาน AC₂ ที่ปริมาณ 3Y มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 416.67 โอห์ม และสูงสุดที่ 3,230 โอห์ม โดยสังเกตได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและค่าความต้านทานของหมึกนำไฟฟ้าที่มีการใช้สารยึดเกาะ AC₂ ในปริมาณต่างๆ จะพบว่า กราฟของหมึกนำไฟฟ้าสูตร NMPAC₂3Y จะมีแนวโน้มที่ใกล้กับหมึกทางการค้ามากที่สุด เมื่อเทียบกับหมึกสูตรอื่น

2.7 วิธีดำเนินการทดลอง ตอนที่ 2

การทดลองส่วนที่ 2 ทำการเตรียมสูตรหมึกโดยแยกเป็นการเตรียมส่วนประกอบที่เป็น binder แล้วศึกษาหาปริมาณของประกอบของส่วน binder ที่เหมาะสมแล้วจึงผสมส่วนที่ทำหน้าที่นำไฟฟ้าลงไป มุ่งเน้นศึกษาความคงทนของหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมเอง ส่วนของสารเคมีที่ใช้สำหรับการดำเนินโครงการวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 2.13

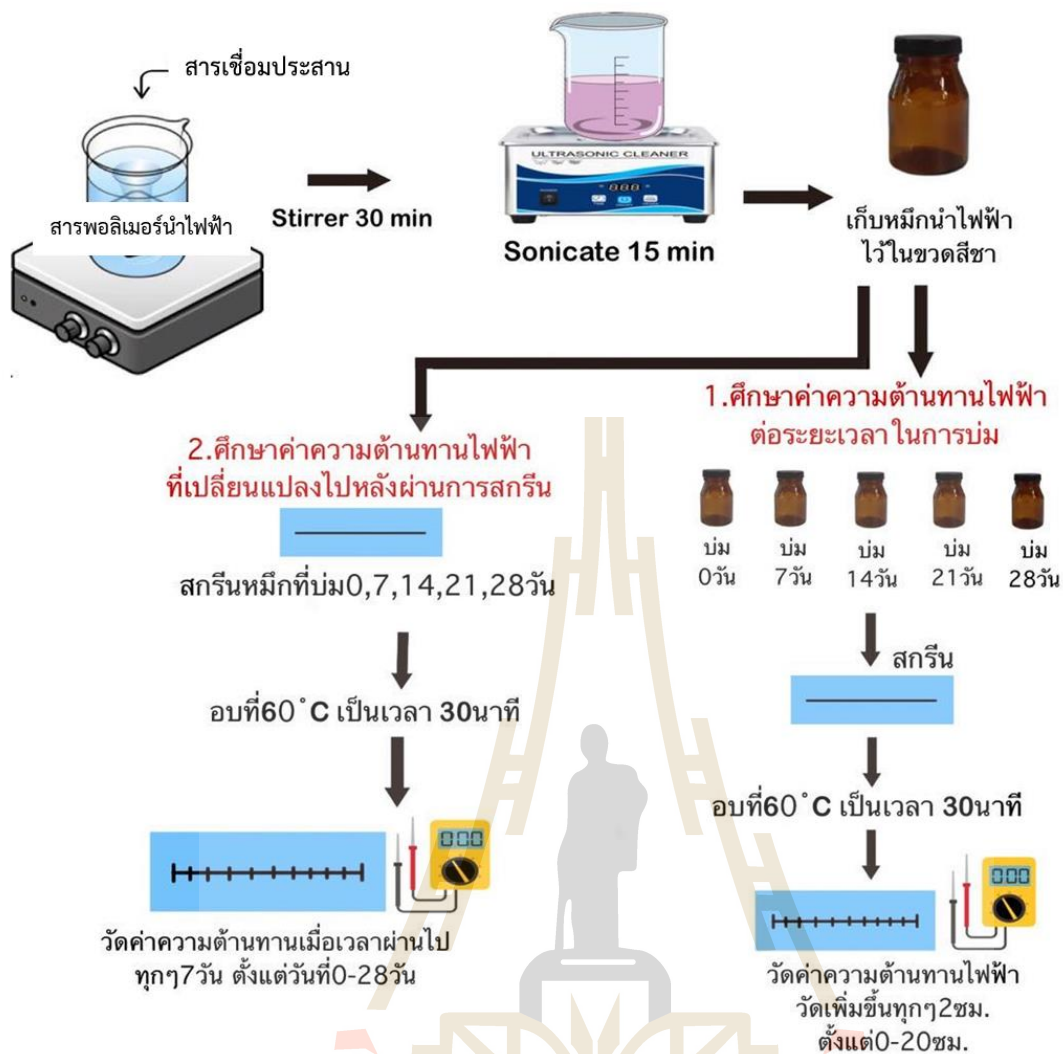
2.7.1 การเตรียม binder ที่ใช้สารพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสารเชื่อมประสาน

ตารางที่ 2.14 สูตร binder ที่ใช้สารพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสารเชื่อมประสานที่ใช้ในการทดลอง

สูตร binder	ความหมาย
PG1	สาร binder ที่มีสารพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (P) เป็นสารประสาน (G) มีปริมาณสารเชื่อมประสาน G1
PG2	สาร binder ที่มีสารพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (P) เป็นสารประสาน (G) มีปริมาณสารเชื่อมประสาน G2
PG3	สาร binder ที่มีสารพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (P) เป็นสารประสาน (G) มีปริมาณสารเชื่อมประสาน G3

วิธีการเตรียมหมึก

1. เตรียมสารพอลิเมอร์ ปริมาณ 20ml ใส่ในบีกเกอร์แล้วใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร 1 แท่ง ลงในแต่ละบีกเกอร์
2. เตรียมสารผสมเชื่อมประสาน ปริมาณ G1, G2 และ G3 ใส่ลงในบีกเกอร์
3. ปิดปากทุกบีกเกอร์ด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปปั่นด้วยเครื่อง Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที
4. เมื่อบั่นสารผสมครบเวลา 30 นาทีแล้ว นำสารแต่ละบีกเกอร์ไปใส่เครื่อง Ultrasonic อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 2.24 แผนภาพแสดงวิธีการเตรียมสารผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า และสารเอมประสาน

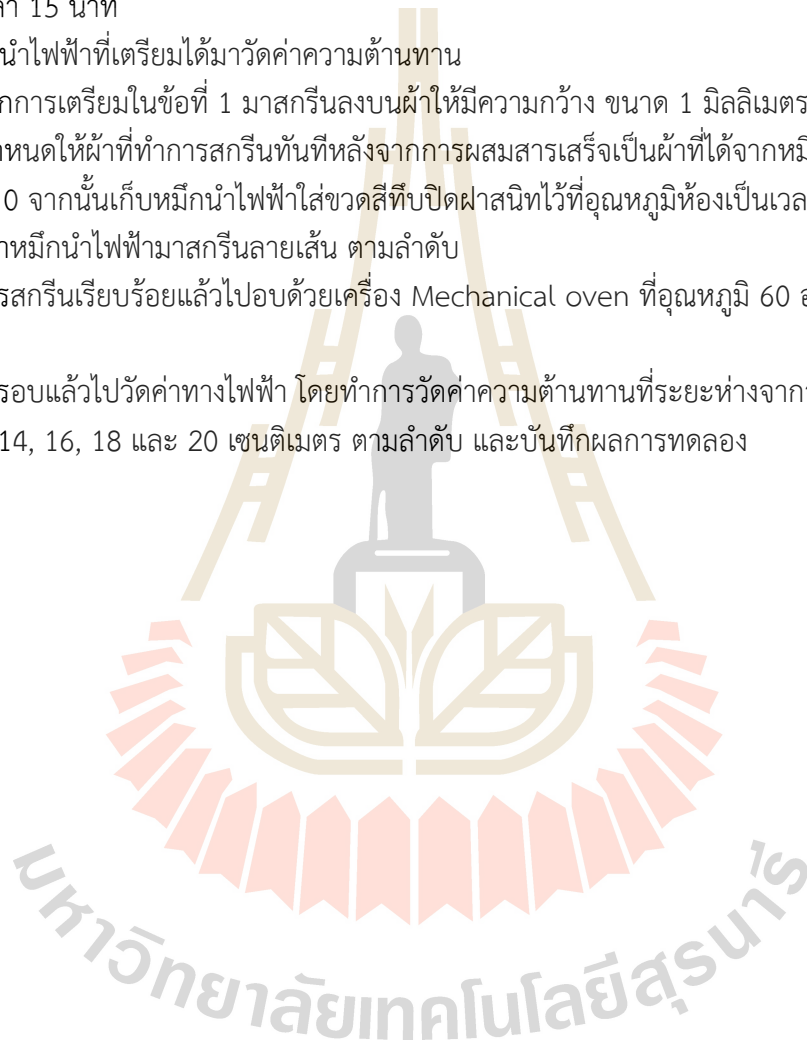
2.7.2 ศึกษาปริมาณกราฟีน และระยะเวลาในการบ่มหมึกนำไฟฟ้า

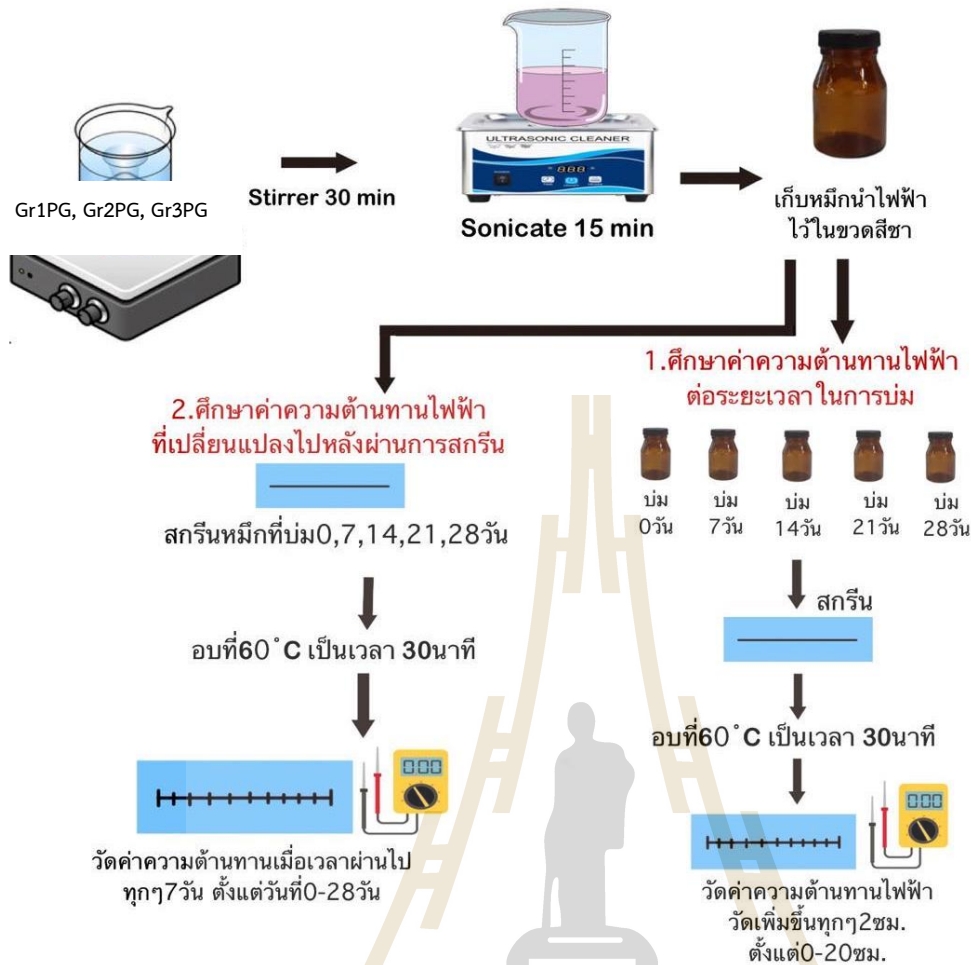
การเตรียมสารผสมระหว่าง P และ G , S เป็นสารช่วยกระจายตัว และกราฟีน เพื่อใช้ทำเป็นหมึกนำไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 2.15 ตารางแสดงส่วนผสมระหว่าง P และ G , S เป็นสารช่วยกระจายตัว และกราฟีน

สูตร binder	ความหมาย
Gr1PG	หมึกนำไฟฟ้าประติษฐ์มีสารพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสารประสานและมีปริมาณกราฟีน Gr1
Gr2PG	หมึกนำไฟฟ้าประติษฐ์มีสารพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสารประสานและมีปริมาณกราฟีน Gr2
Gr3PG	หมึกนำไฟฟ้าประติษฐ์มีสารพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสารประสานและมีปริมาณกราฟีน Gr3

1. เตรียมพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ปริมาณตามในตารางที่3.3 20ml ใส่ในบีกเกอร์แล้ว ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร 1 แท่ง ลงในบีกเกอร์
2. เตรียมสารเชื่อมประสาน G1 ได้จากผลการทดลองหาปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม สำหรับเติมลงใน สารพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ใส่ลงในบีกเกอร์
3. เตรียมกราฟีนปริมาณ Gr1, Gr2 และ Gr3 ใส่ลงในบีกเกอร์
4. ปิดปากทุกบีกเกอร์ด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปปั่นด้วยเครื่อง Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที
5. เมื่อบั่นสารผสมครบเวลา 30 นาทีแล้ว นำสารแต่ละบีกเกอร์ไปใส่เครื่อง Ultrasonic อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
6. การสกรีนหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้มาวัดค่าความต้านทาน
7. นำหมึกที่ได้จากการเตรียมในข้อที่ 1 มาสกรีนลงบนผ้าให้มีความกว้าง ขนาด 1 มิลลิเมตร ยาว 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ผ้าที่ทำการสกรีนทันทีหลังจากการผสมสารเสร็จเป็นผ้าที่ได้จากหมึกนำไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการบ่ม วันที่ 0 จากนั้นเก็บหมึกนำไฟฟ้าใส่ขวดสีทึบปิดฝาสนิทไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7วัน, 14วัน, 21 วัน และ 28วัน นำหมึกนำไฟฟ้ามาสกรีนลายเส้น ตามลำดับ
8. นำผ้าที่ผ่านการสกรีนเรียบร้อยแล้วไปอบด้วยเครื่อง Mechanical oven ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
9. นำผ้าที่ผ่านการอบแล้วไปวัดค่าทางไฟฟ้า โดยทำการวัดค่าความต้านทานที่ระยะห่างจากจุดเริ่มต้น คือที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ และบันทึกผลการทดลอง





รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงวิธีการเตรียมหมักนำไฟฟ้า

2.7.3 ศึกษาการเคลือบผ้ากันความชื้น

วิธีการการเตรียมผ้าก่อนนำไปเคลือบสารเคลือบผ้า

ส่วนผสมสำหรับการเตรียมสารเคลือบผ้าแสดงในตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 ตารางแสดงส่วนผสมการเตรียมสารเคลือบผ้า

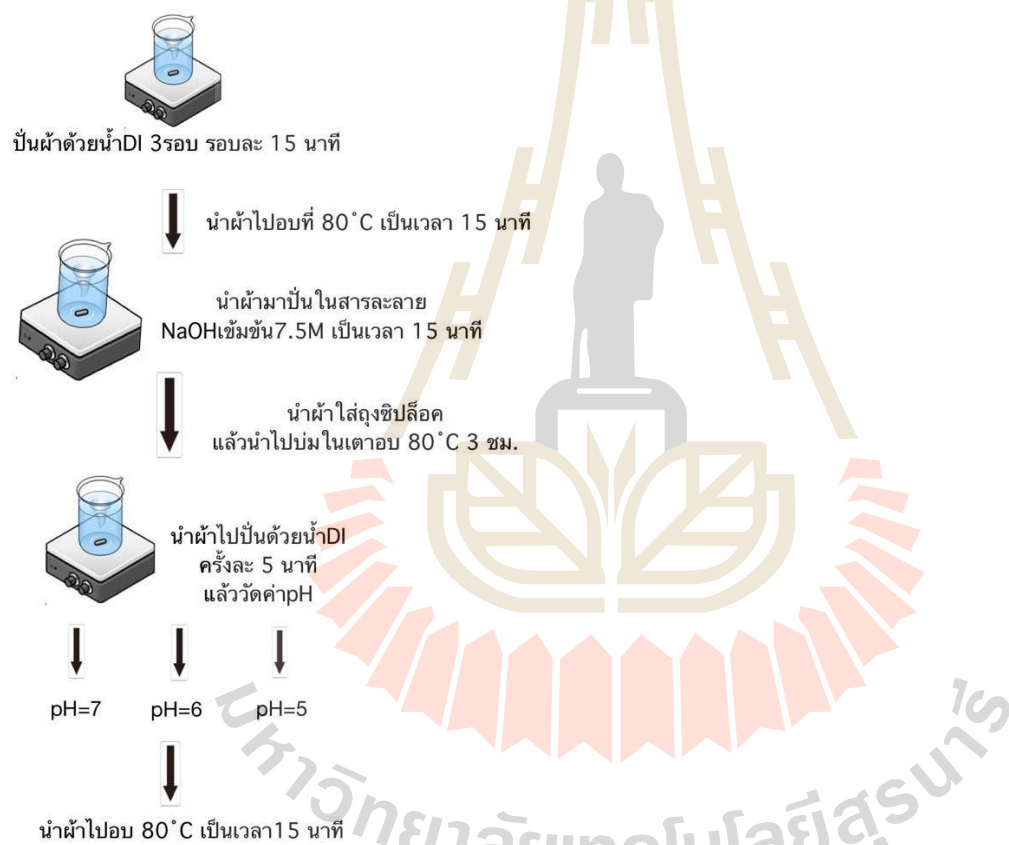
Formular	โพลูนีน และ APTES : PDMS	
	อัตราส่วนโดยปริมาตร(ml)	%wt
1	50 : 0.5 : 0.5	98.023 : 0.778 : 1.198
2	50 : 0.5 : 1.0	96.864 : 0.768 : 2.368
3	50 : 0.5 : 1.5	95.731 : 0.759 : 3.509
4	50 : 0.5 : 2.0	94.624 : 0.750 : 4.626
5	50 : 0.5 : 2.5	93.533 : 0.742 : 5.715

1. ทำความสะอาดผ้าคอตตอนด้วยน้ำดีไอ (Deionized water) โดยนำผ้าใส่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำดีไอแล้วนำไปกวนบนเครื่อง Magnetic stirrer ครั้งละ 15 นาที 3 ครั้ง

- นำผ้าที่ทำความสะอาดแล้วไปอบให้แห้งที่80องศาเซลเซียสเป็นเวลา15นาที
- ทำการบ่มผ้า (Treatment) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น7.5โมลาร์ ที่บ่มไว้อย่างน้อย1วันแล้ว จึงนำมาบ่มผ้าโดยการนำผ้าใส่ในบีกเกอร์ที่มี NaOH เข้มข้น 7.5 โมลาร์ แล้วนำไปกวนบนเครื่องMagnetic stirrer 15 นาที จากนั้นนำใส่ถุงซิปล็อคแล้วนำเข้าเตาอบที่80องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง
- นำออกจากถุงซิปล็อคแล้วล้างผ้าด้วยน้ำดีไอ 5 ครั้ง โดยการกวนบนMagnetic stirrerครั้งละ5นาที จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่ 80 องศาเซลเซียส 15 นาที

วิธีการเตรียมสารเคลือบผ้า

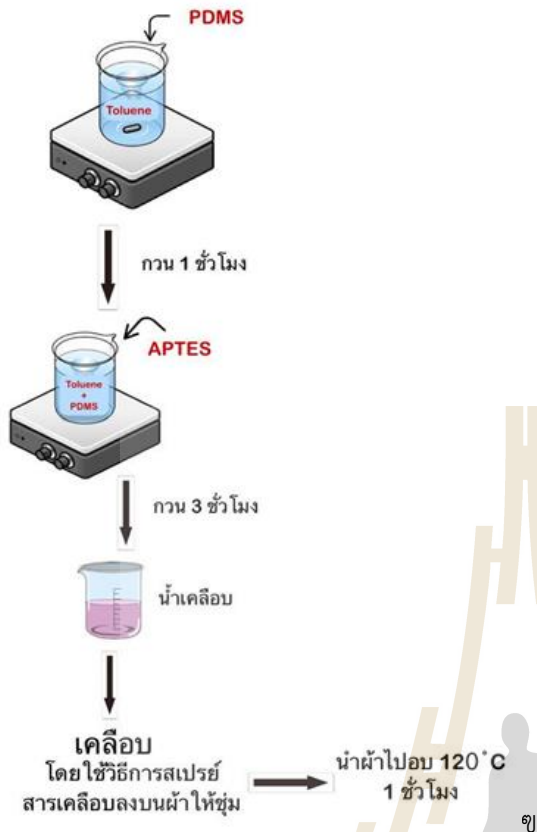
- นำโพลีอีนไสในบีกเกอร์แล้วเติม PDMS (Polydimethylsiloxane) จากนั้นนำไปกวนบน Magnetic stirrer 1 ชั่วโมง
- เติม APTES (3-aminopropyltriethoxsilane) แล้วนำไปกวนบนMagnetic stirrer 3 ชั่วโมง รูปขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบผ้าแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนนำไปเคลือบสารเคลือบผ้า

วิธีการเคลือบสารเคลือบผ้าด้วยการพ่นเคลือบ

- นำน้ำเคลือบที่เตรียมไว้ในข้อ 2 ใส่ลงในขวดพ่น (Spray) แล้วนำไปพ่นใส่ผ้าที่เตรียมไว้ในข้อ 1
- นำไปอบให้แห้งที่60องศาเซลเซียส 30 นาที
- การนำตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติ



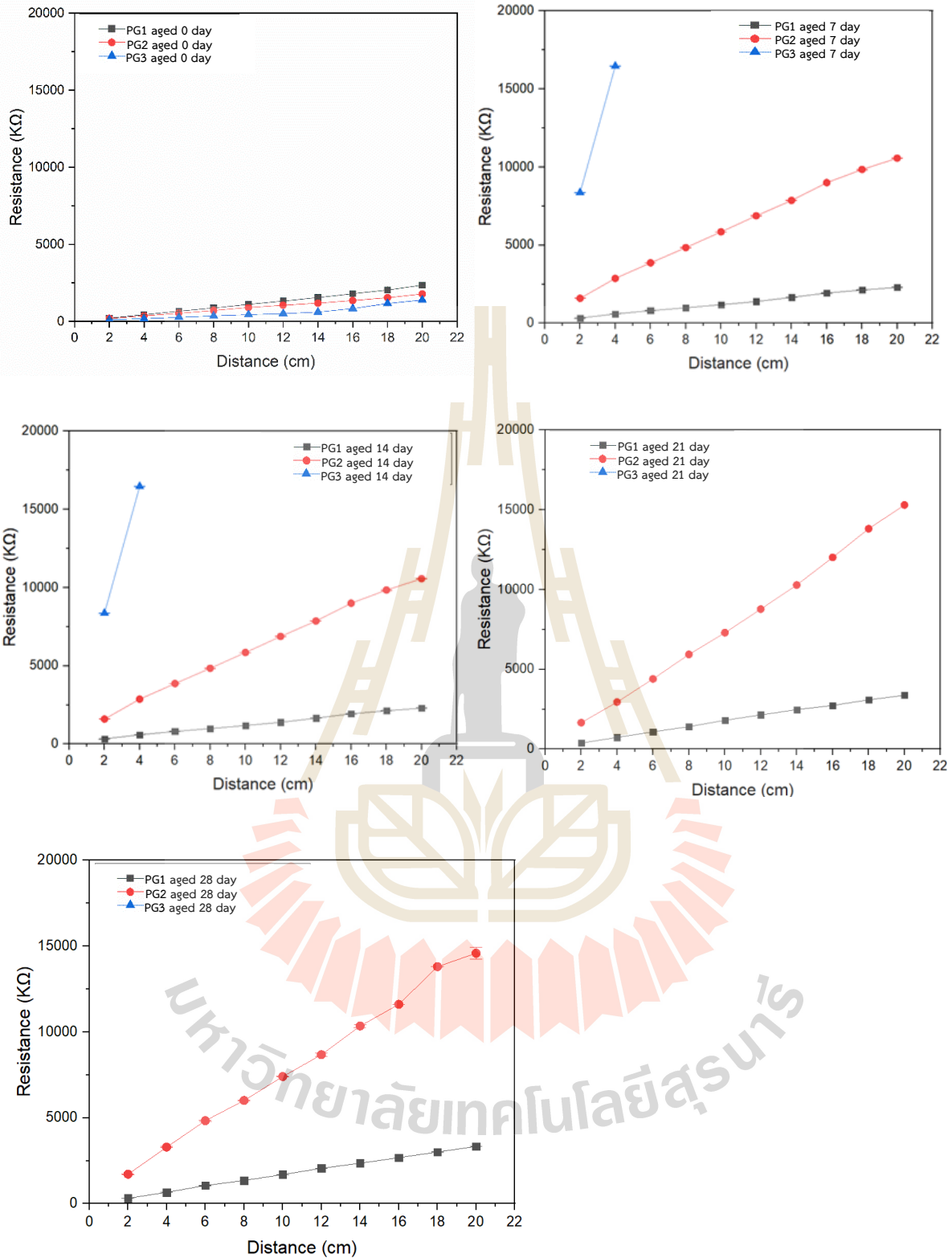
รูปที่ 2.27 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบผ้าและขั้นตอนการพ่นเคลือบ

2.8 ผลการศึกษา ตอนที่ 2

2.8.1 ผลของ สารเชื่อมประสาน ต่อคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของส่วนผสมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็น binder

ระยะเวลาในการบ่ม

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าตารางของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



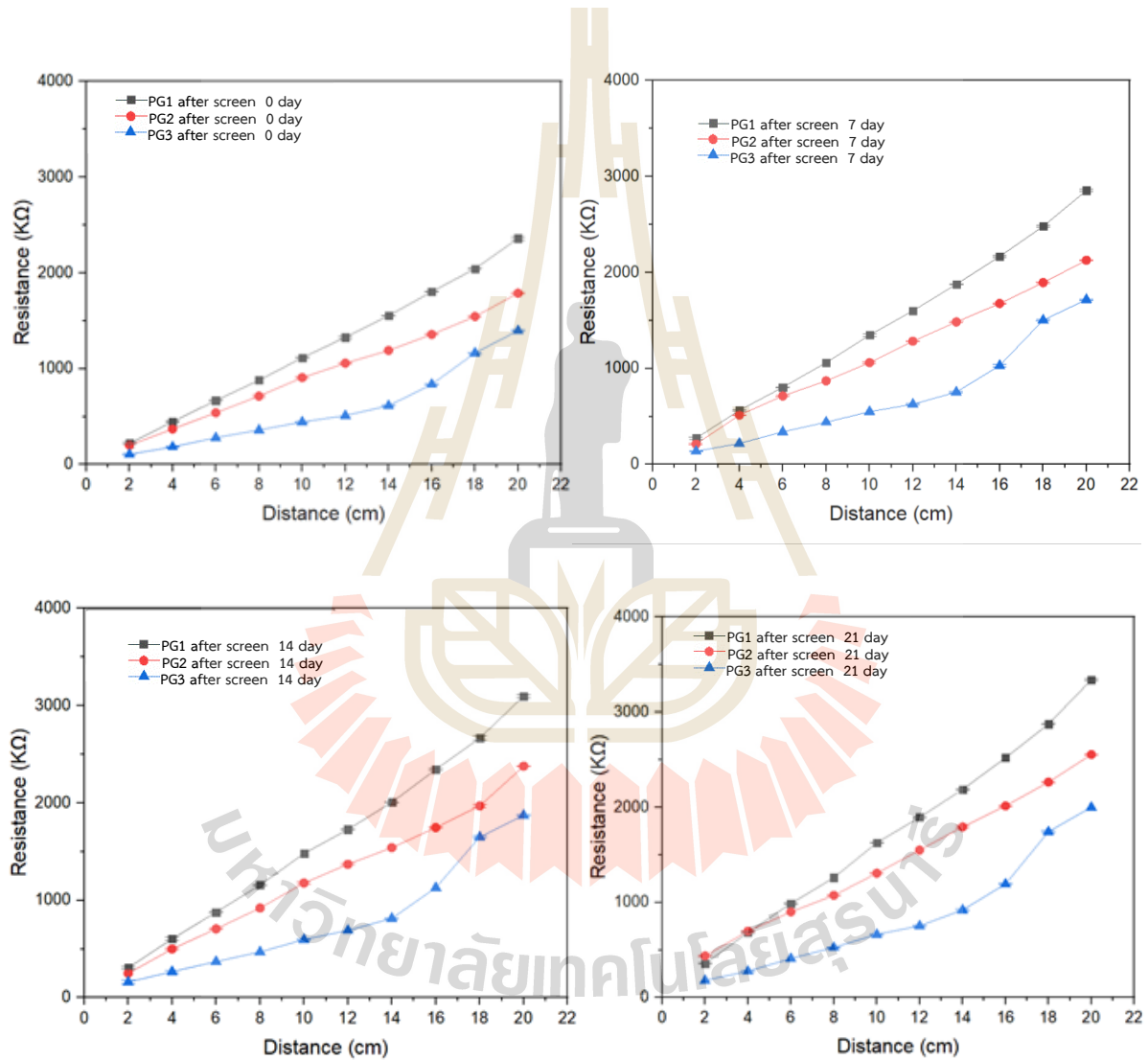
รูปที่ 2.28 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่ป่นไว้ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.28 การทดลองผสมหมึกนำไฟฟ้าผู้ทดลองได้เริ่มต้นจากการศึกษาปริมาณสารเชื่อมประสาน (G) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสานพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (P) แล้วเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหเพื่อให้หมึกนำไฟฟ้า

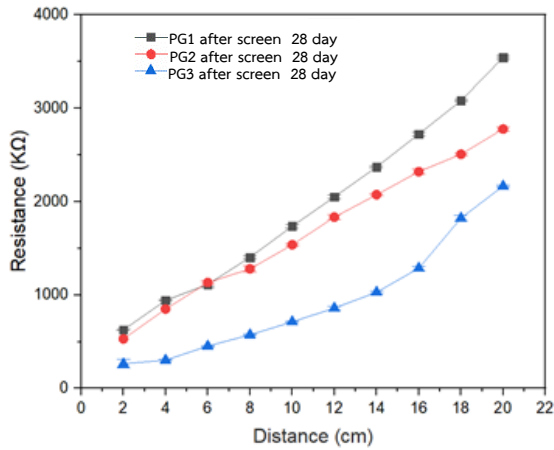
สามารถยึดเกาะกับผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการทดลองศึกษาปริมาณสารเชื่อมประสาน (G) ทั้งหมด 3 สูตร ได้แก่ PG1, PG2 และ PG3 ที่นำไปสกรีนแล้วติดตามผลค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อนำไปบ่มไว้ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน (ปัจจัยที่ 1) พบว่า PG1 ที่บ่มไว้ 7 วัน หรือไม่ผ่านการบ่มมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ 343.33 – 2136.67 กิโลโอห์ม ที่ระยะทาง 0- 20 เซ็นติเมตร

2.8.2 ผลของระยะเวลาหลังผ่านการสกรีน

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าตารางของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 0 วัน ทำการวัดในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้

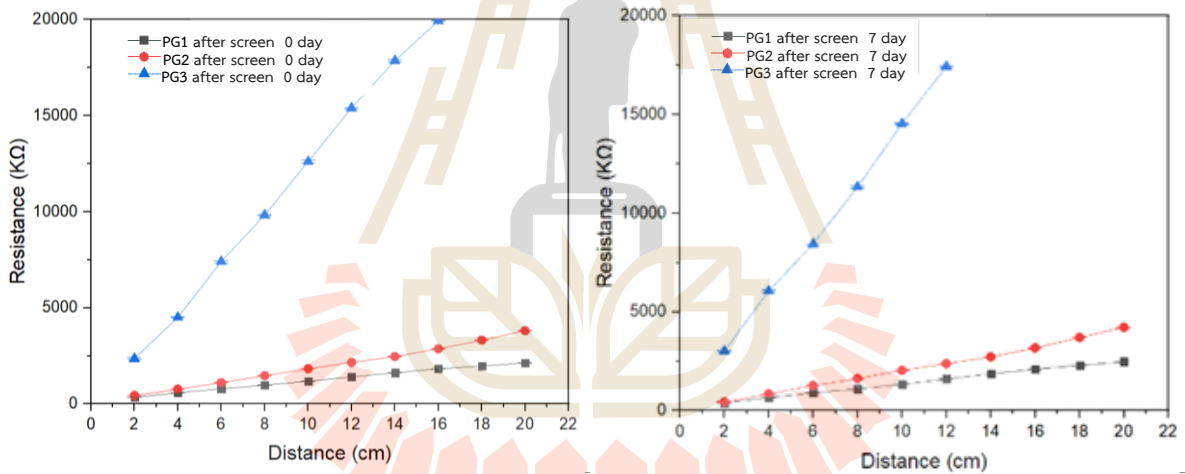


รูปที่ 2.29 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 0 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

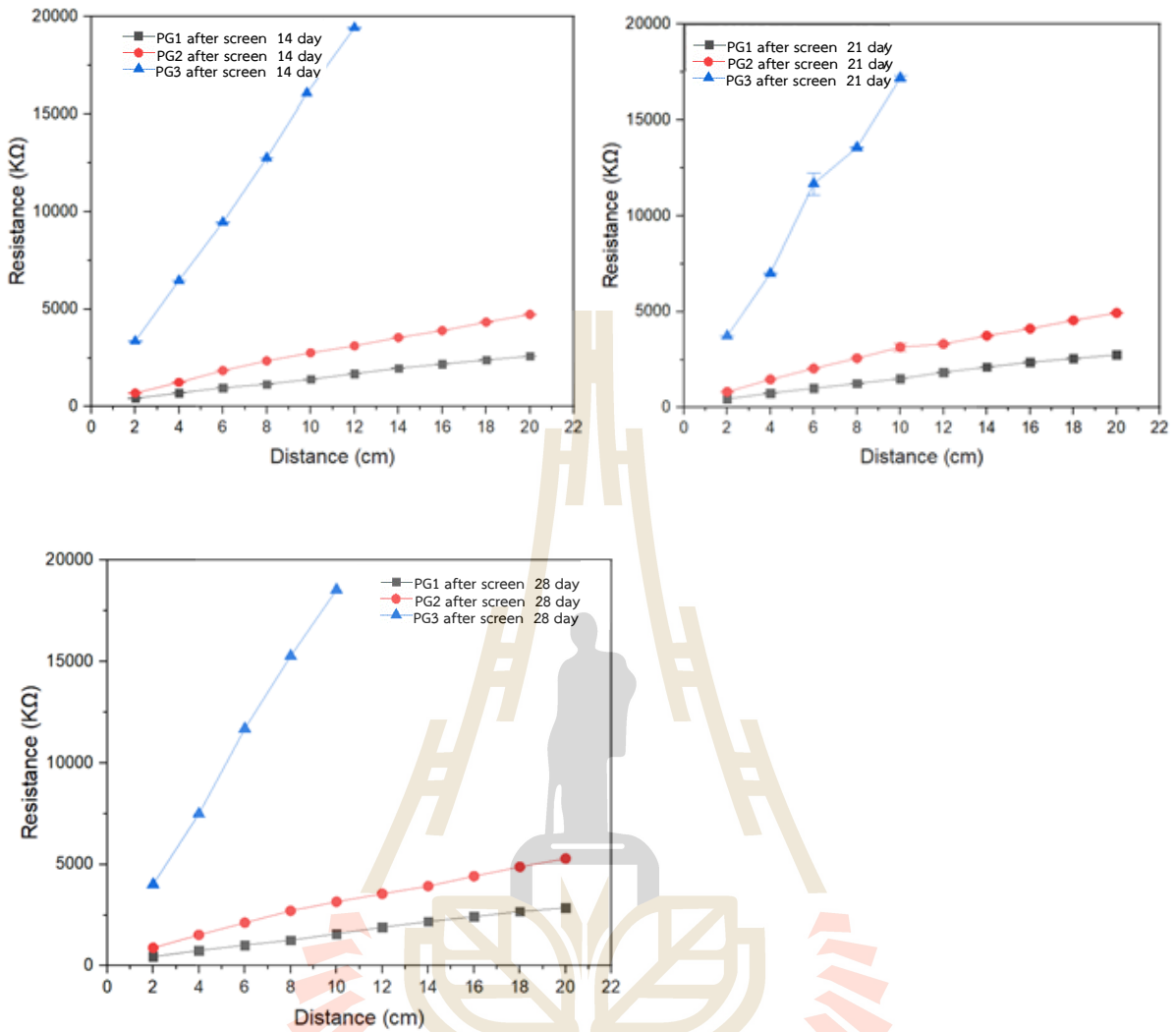


รูปที่ 2.29 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่ปั๊มไว้ 0 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ต่อ

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าตารางของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่ปั๊มไว้ 7 วัน ทำการวัดในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้

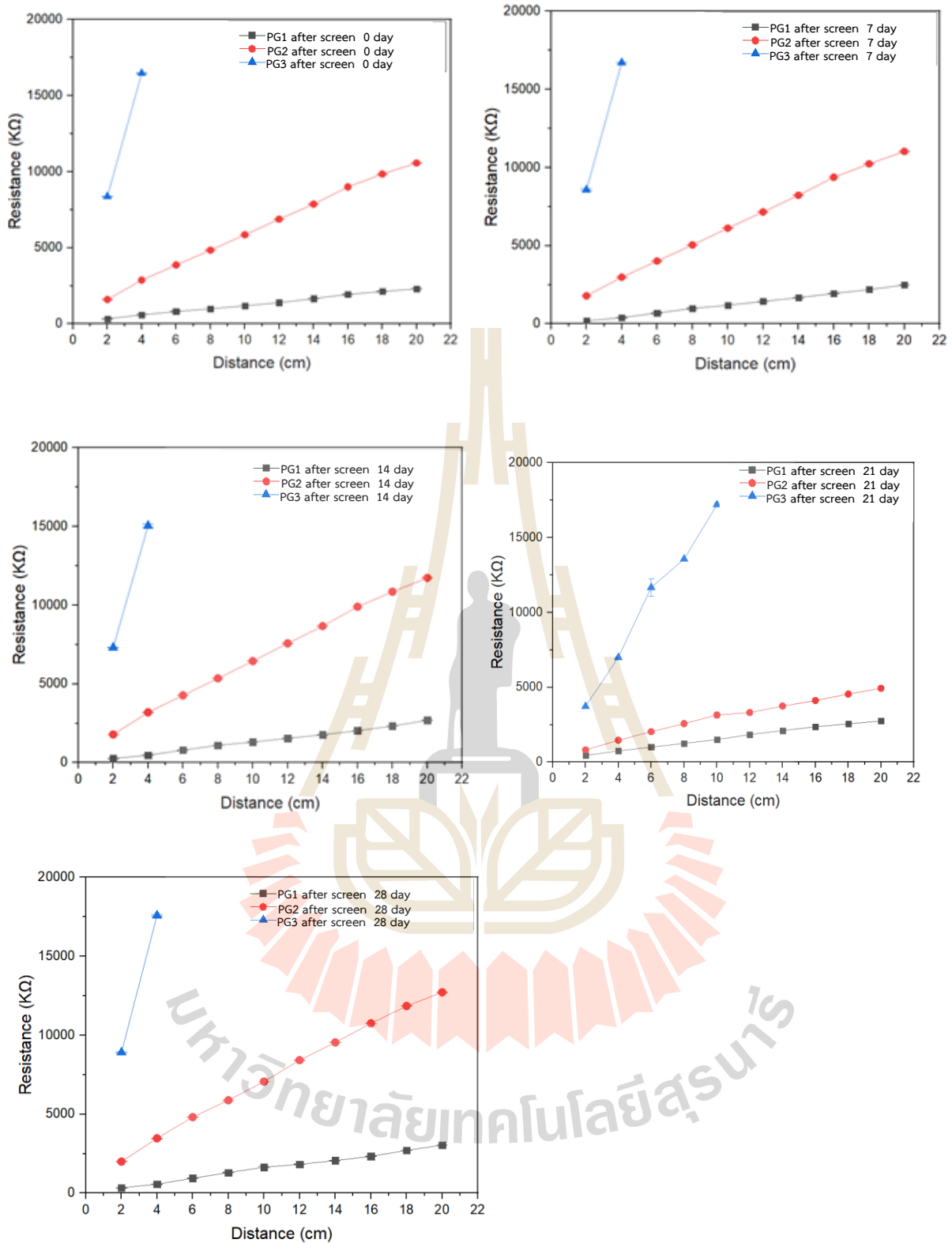


รูปที่ 2.30 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่ปั๊มไว้ 7 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ



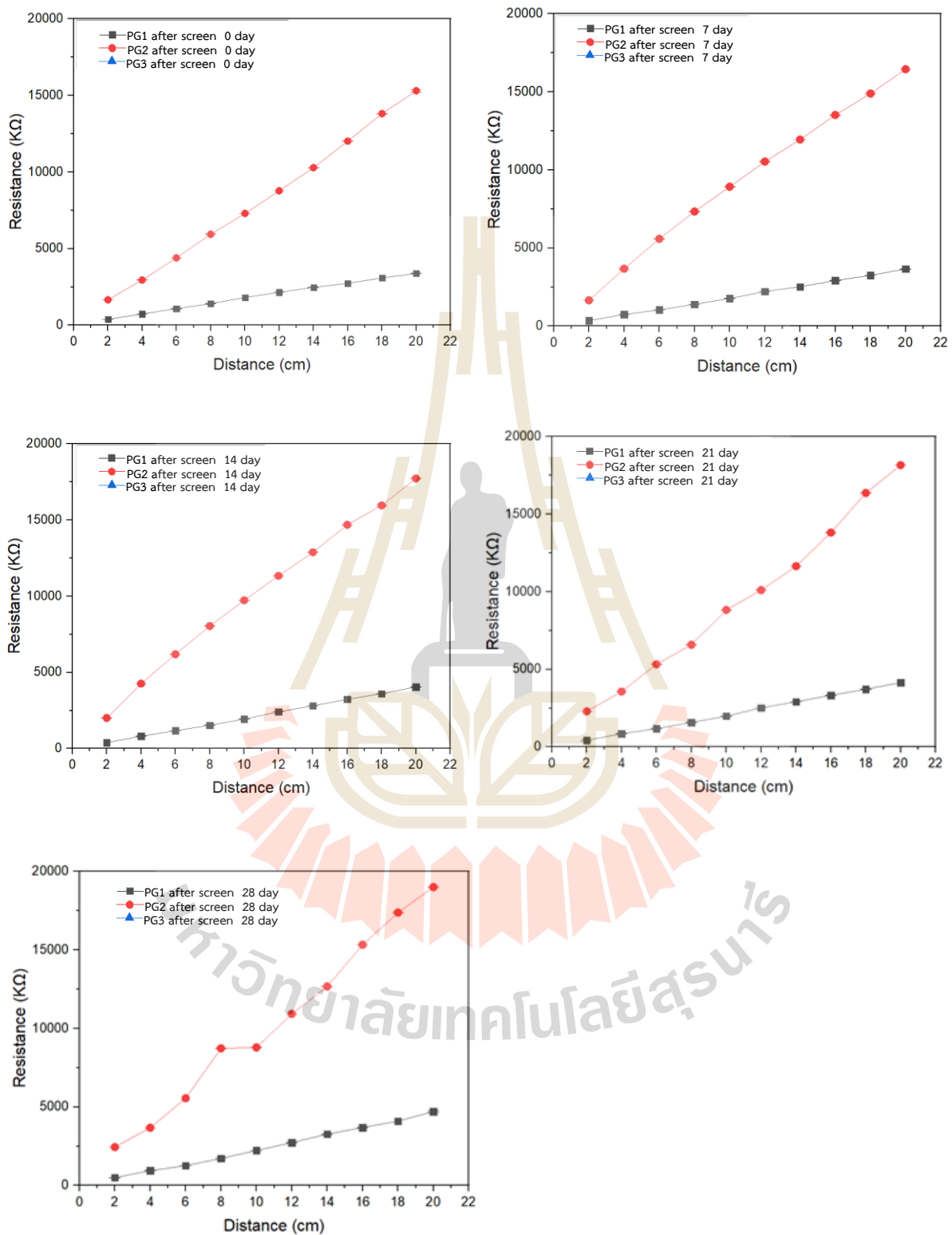
รูปที่ 2.30 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่ป่นไว้ 7 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ต่อ

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าตารางของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่ป่นไว้ 14 วัน ทำการวัดในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



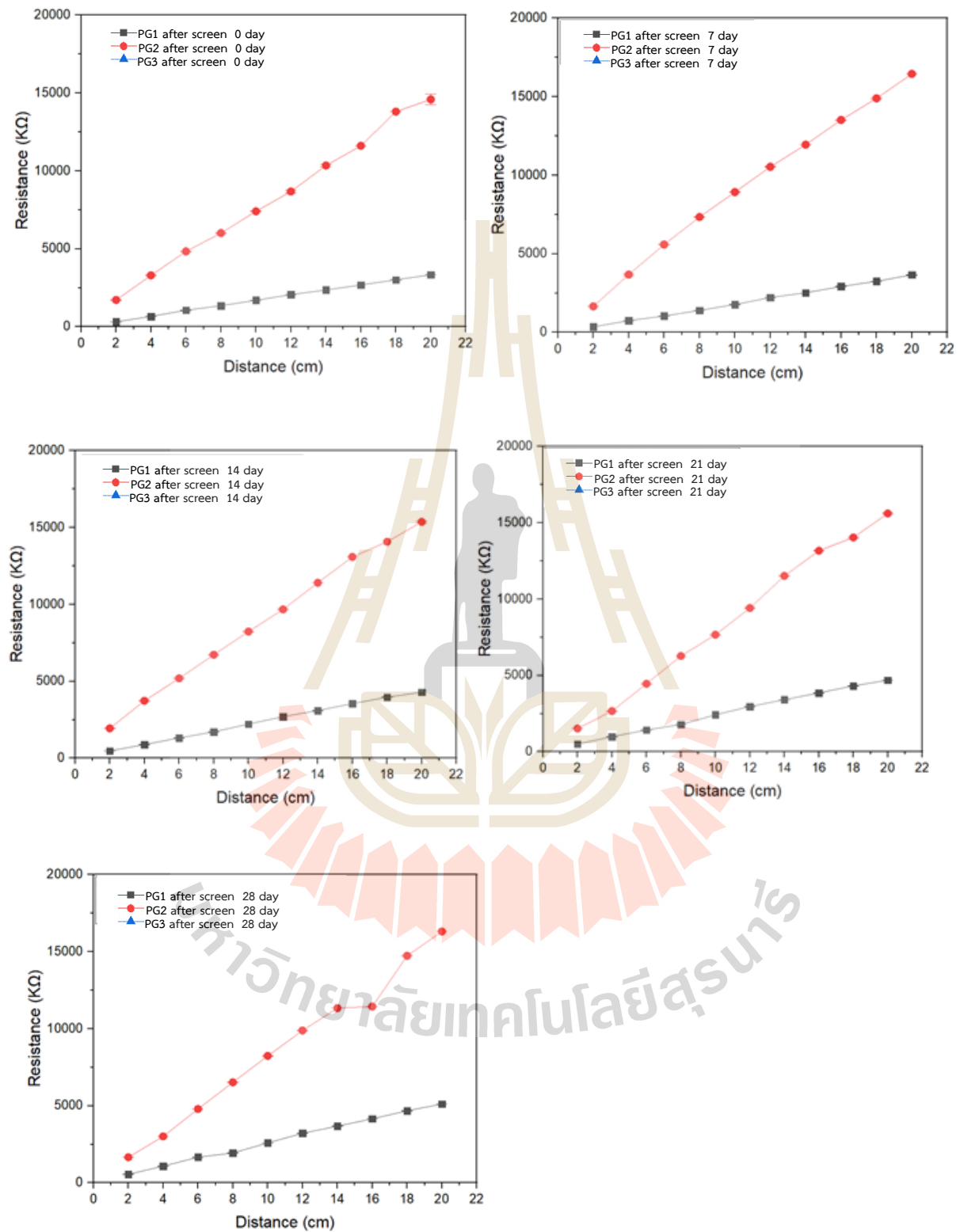
รูปที่ 2.31 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่พิมพ์ไว้ 14 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าตารางของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 21 วัน ทำการวัดในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 2.32 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 21 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าตารางของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 28 วัน ทำการวัดในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้

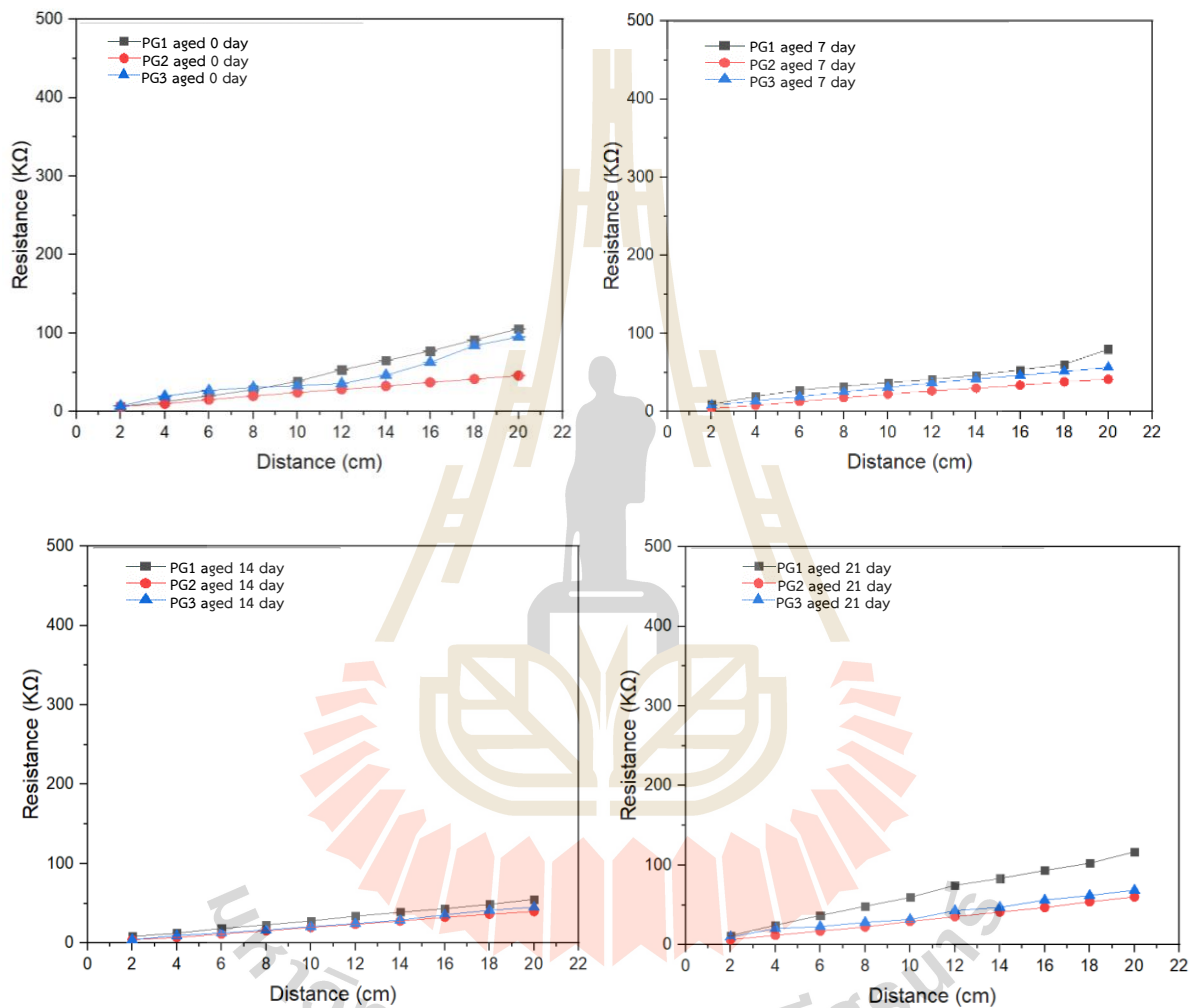


รูปที่ 2.33 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 ที่บ่มไว้ 28 วัน ทำการวัดในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

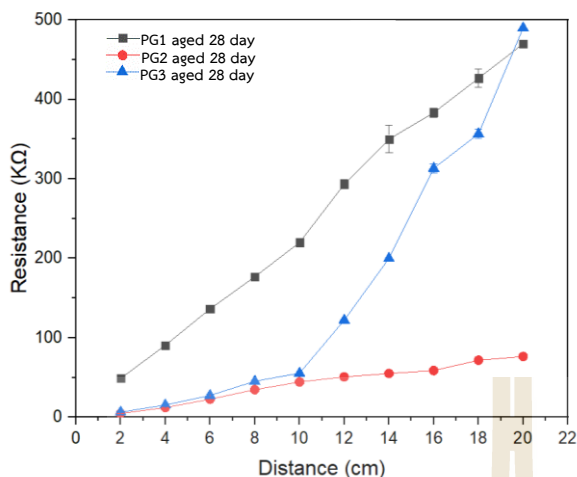
จากผลการทดลองวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร PG1, PG2 และ PG3 เมื่อนำหมึกแต่ละสูตรมาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าหลังผ่านการสกรีนทุกๆ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของปัจจัยที่ 1

2.8.3 ผลการศึกษาปริมาณกราฟีนในหมึกและระยะเวลาในการบ่มหมึกต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า

ผลจากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



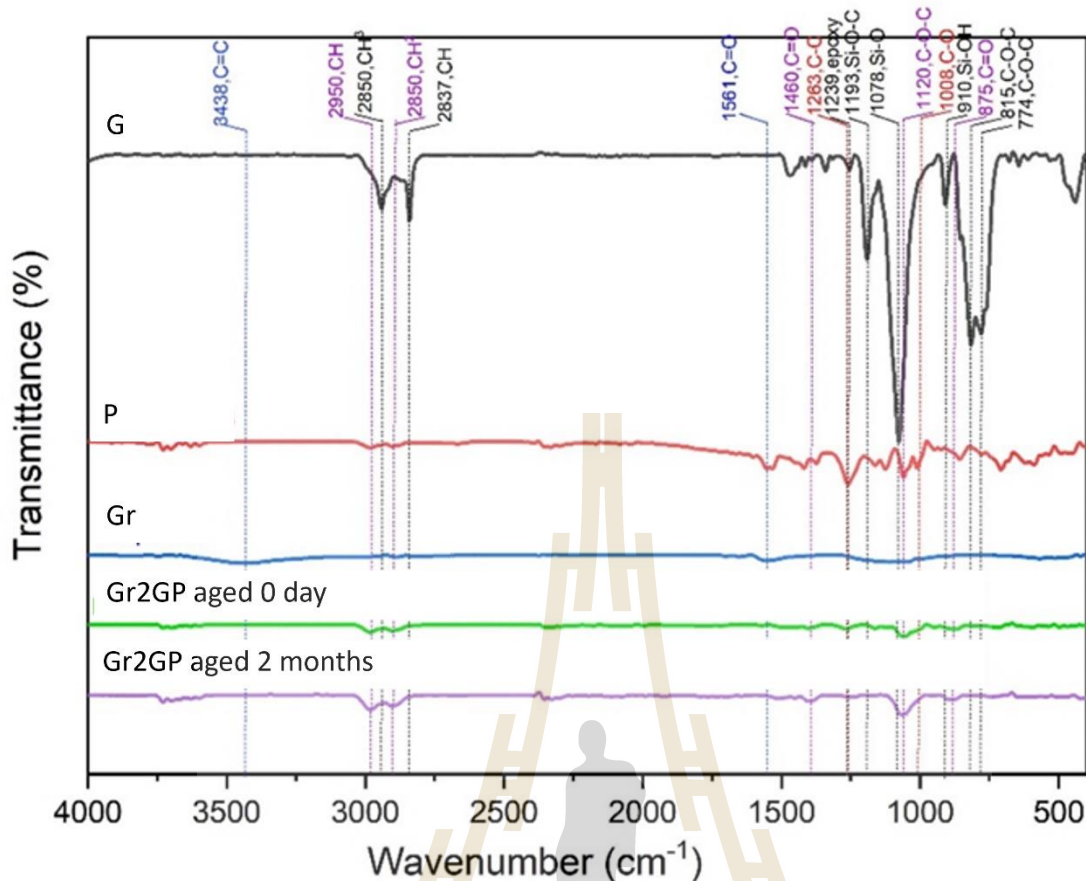
รูปที่ 2.34 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 2.34 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ต่อ

จากผลการทดลองของระยะเวลาการบ่มหมึกนำไฟฟ้า Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่ม 0, 7, 14, 21 และ 28 หลังผ่านการสกรีน 0, 7, 14, 21 และ 28 วันทีนำไปสกรีนเพื่อทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้า หลังการบ่มทุกๆ 7 วัน ตั้งแต่วันที่ 0 ถึง วันที่ 28 พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าเรียงจากค่าน้อยที่สุดคือ กราฟีน Gr2PG, Gr3PG และ Gr1PG ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง และต่ำสุดเมื่อระยะเวลาการบ่มครบ 14 วัน และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อบ่มครบ 21 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านการบ่มเป็นระยะเวลาเพิ่มขึ้น

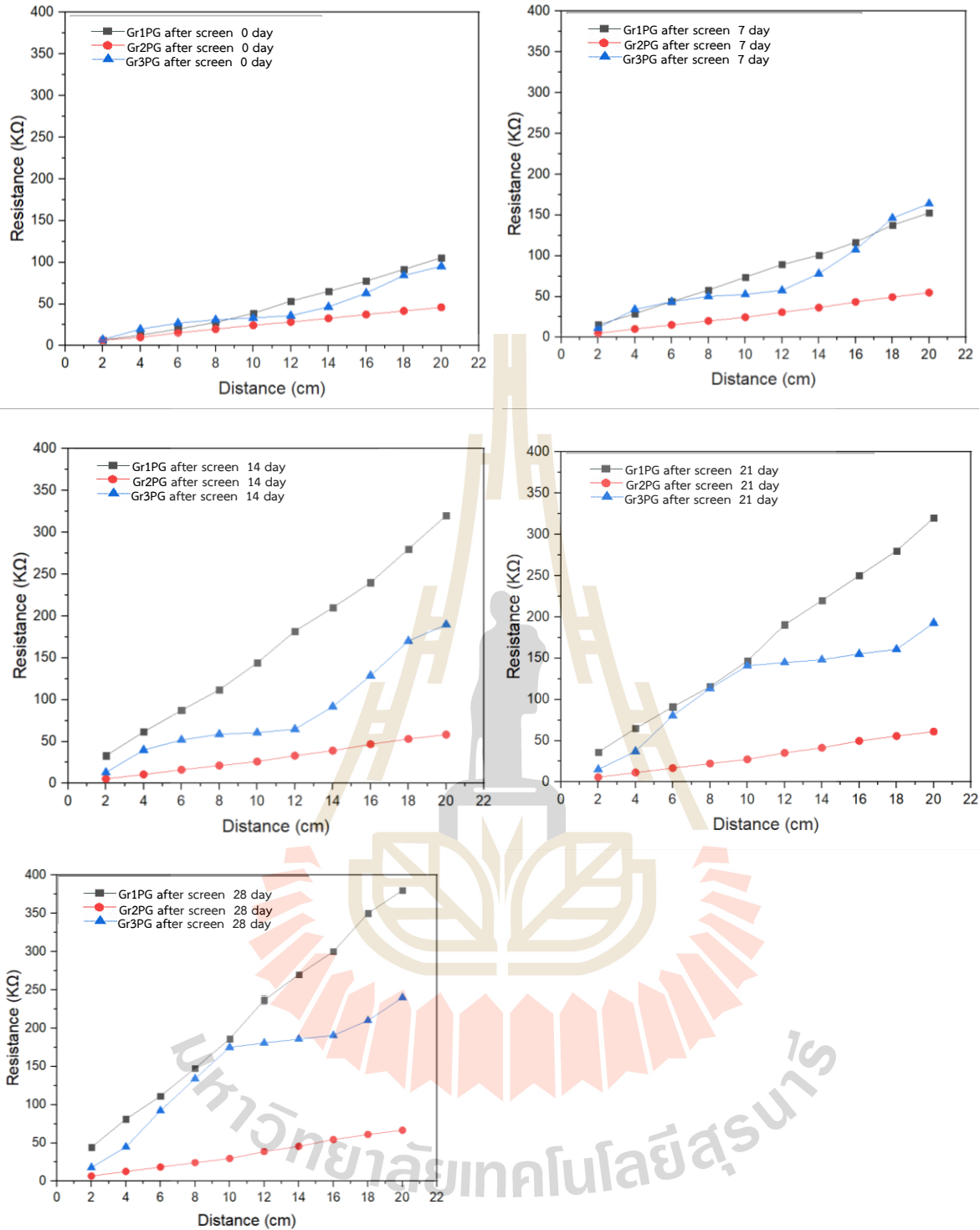
การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน จำแนกสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ หรือตรวจสอบโครงสร้าง ด้วยเครื่องวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)) โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรด (Middle infrared region) ประมาณ $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับ ความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือการหมุน (Bending) ของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุล จะทำให้โมเลกุล ดังกล่าวเกิดการดูดกลืนแสง และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้น เครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น (Wave number) ได้ผลเป็นสเปกตรัม ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นเฉพาะต่างกัน ดัง รูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของสารพอลิเมอร์นำไฟฟ้า สารเชื่อมประสาน และ กราฟีน หมึกนำไฟฟ้าที่บ่มไว้ 0 วันและหมึกนำไฟฟ้าที่บ่มไว้ 2 เดือน

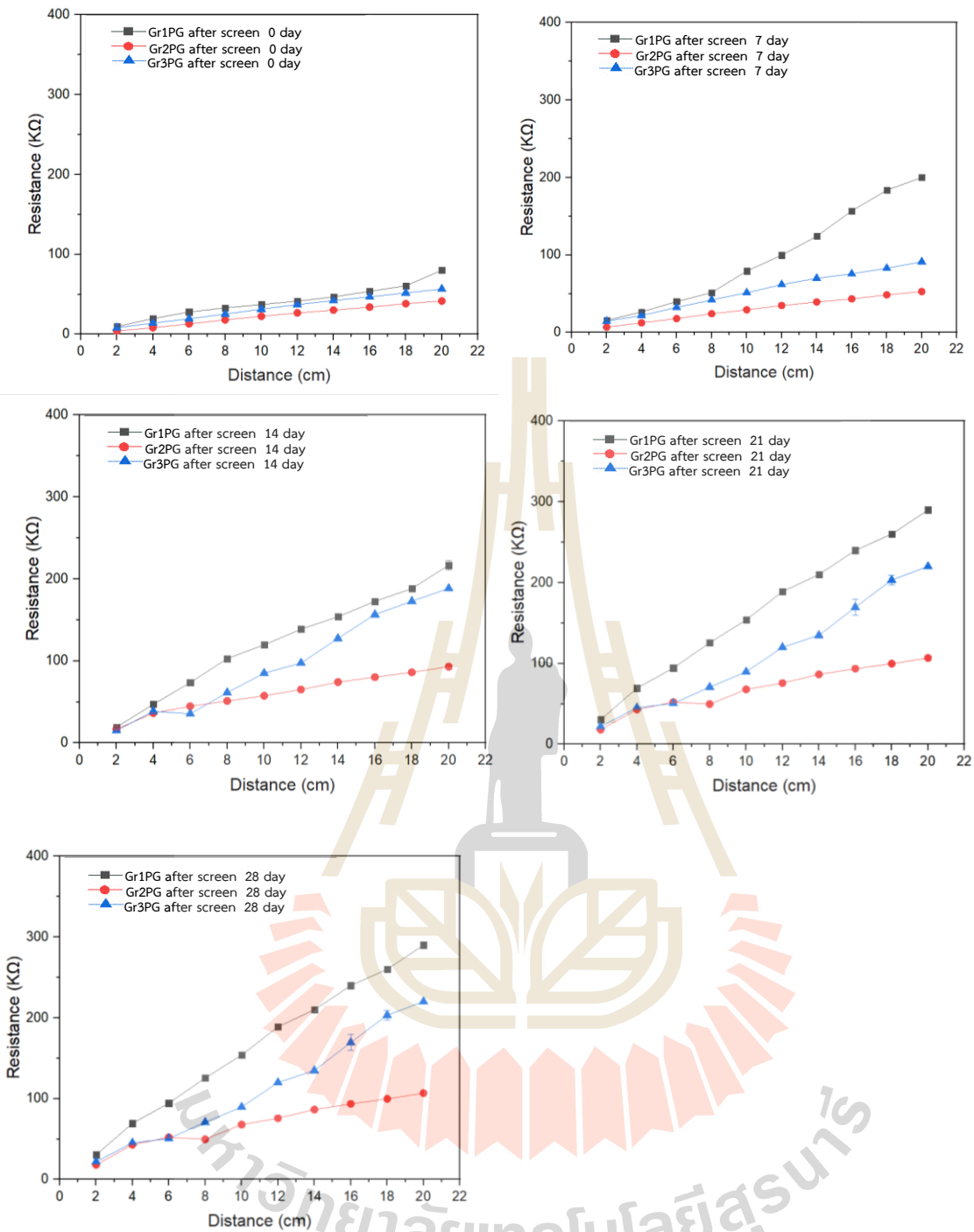
การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ว่ามีการเกิดหมู่ฟังก์ชัน Alkanes ที่ความถี่ของการสั่นของพันธะ CH (แบบยืด) ของหมู่เมทิล CH_3 และหมู่เมทิลีน CH_2 ในช่วงความถี่ $2850\text{-}2950\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ฟังก์ชัน Aromatic hydrocarbons ที่ความถี่ของการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ (แบบยืด) ของอะตอมคาร์บอนในเบนซีนในช่วงความถี่ $1,460\text{-}1,600\text{ cm}^{-1}$ โดยเฉพาะที่ความถี่ $1,500\text{ cm}^{-1}$ จะเห็นพีกได้ชัดเจน แสดงว่าโครงสร้างมีหมู่ฟีนิล (Phenyl group,) เช่น อินฟารเรดสเปกตรัมของโพลีอินและหมู่ฟังก์ชัน แอลกอฮอล์และสารประกอบฟีนอลิก ที่ความถี่ของการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ (แบบยืด) ที่ช่วงความถี่ $1,000\text{-}1,410\text{ cm}^{-1}$ การสั่นนี้สามารถบอกชนิด แอลกอฮอล์อิมตัว ดังรูปที่ 4.36

ผลการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าในตารางของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 0 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



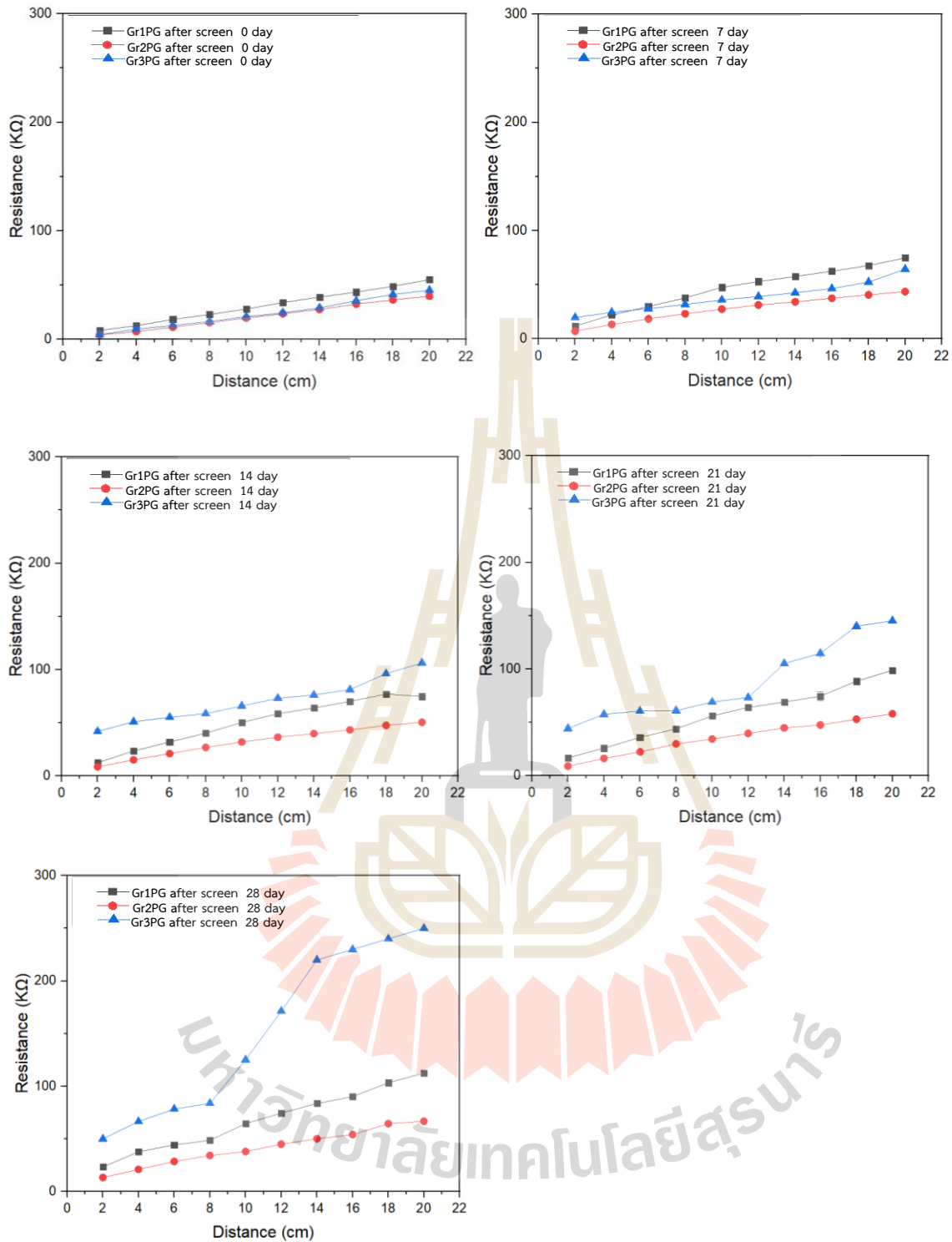
รูปที่ 2.36 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 0 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าในตารางของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 7 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



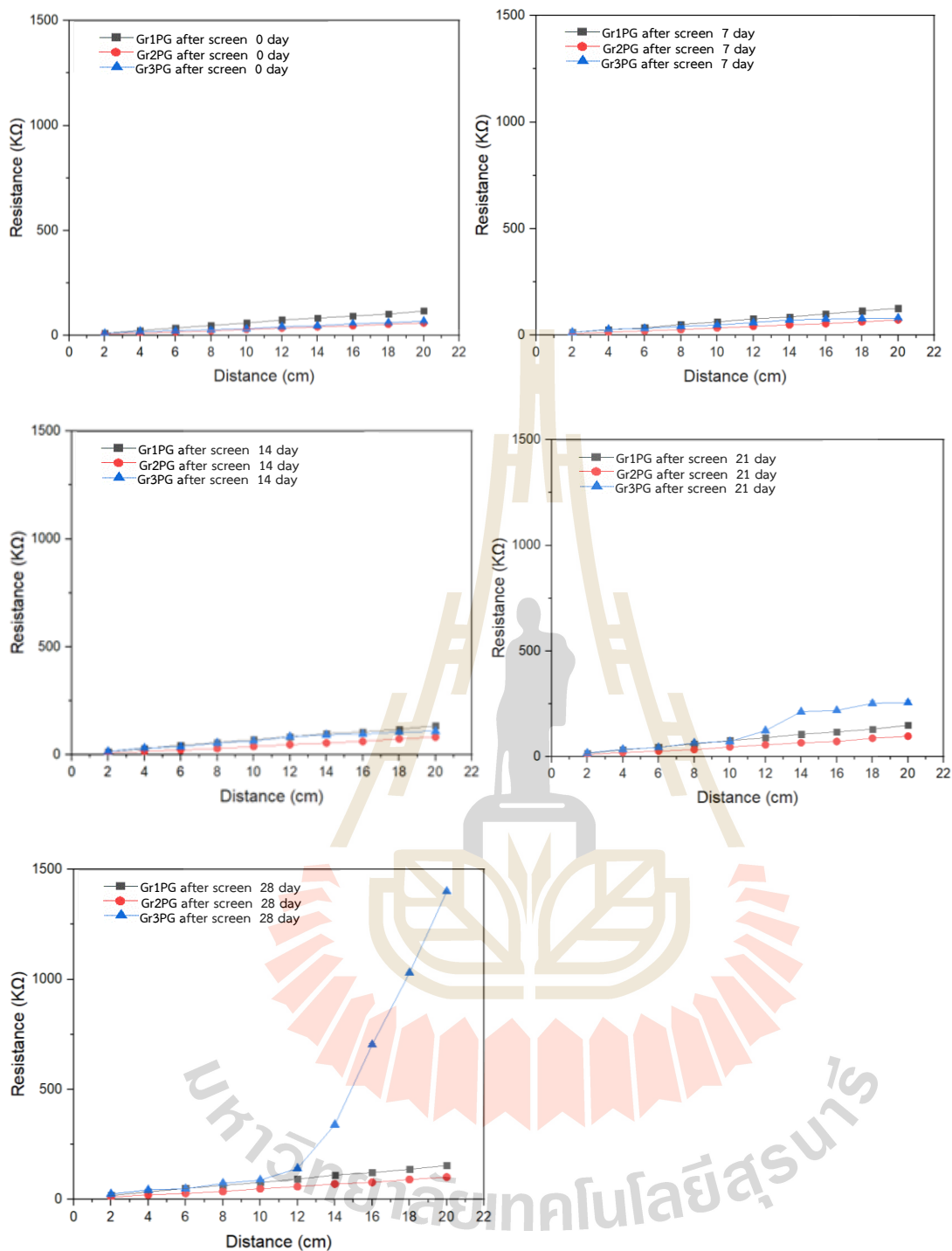
รูปที่ 2.37 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 7 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าในตารางของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 14 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



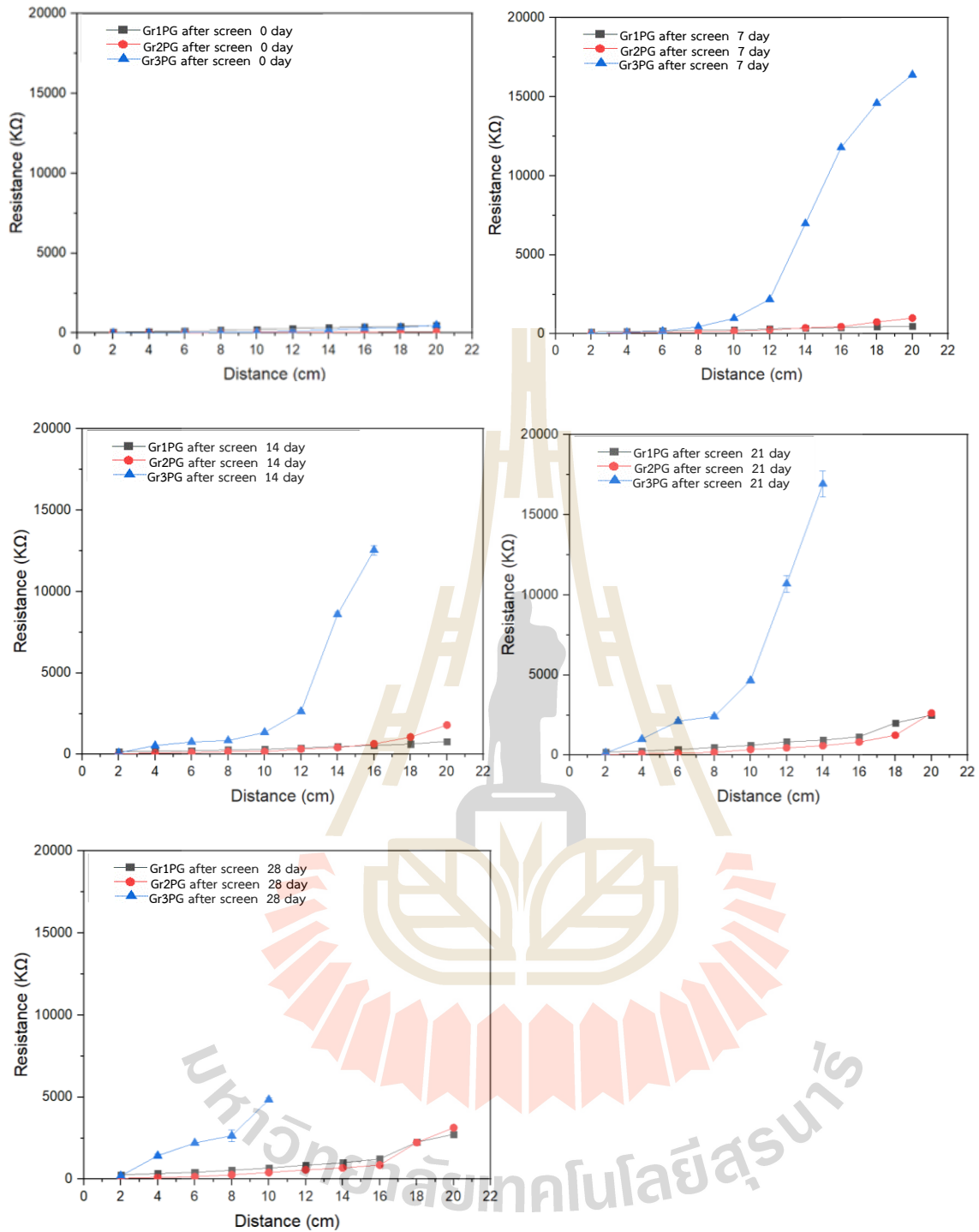
รูปที่ 2.38 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 14 วัน และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ต่อ

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าในตารางของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 21 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 2.39 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร ก Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่ปั๊มไว้ 21 วัน และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

จากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าในตารางของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่ปั๊มไว้ 28 วันและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 2.40 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกสูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่มไว้ 28 วัน และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในวันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

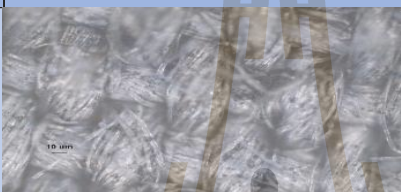





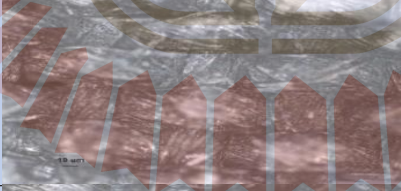



จากผลการทดลองของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผ่านการสกรีนในระยะเวลาต่างๆ ของหมึก สูตร Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ที่บ่ม 0, 7, 14, 21 และ 28 หลังผ่านการสกรีน 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ที่นำไปสกรีนเพื่อทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าหลังการสกรีนทุกๆ 7 วัน ตั้งแต่วันที่ 0 ถึง วันที่ 28 พบว่า

หลังจากสกรีนหมึกนำไฟฟ้าแล้ววัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไปค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น ของ Gr2PG, Gr1PG และ Gr3PG ตามลำดับ ซึ่งหมึก Gr3PG จะเริ่มพบค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 20000 กิโลโอห์ม ในหมึกที่บ่มไว้ 28 วันและผ่านการสกรีน 14 วัน เป็นต้นไป

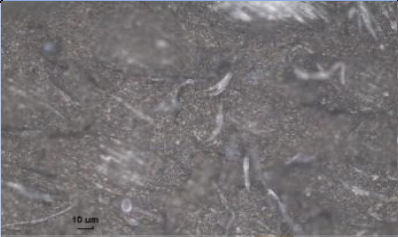


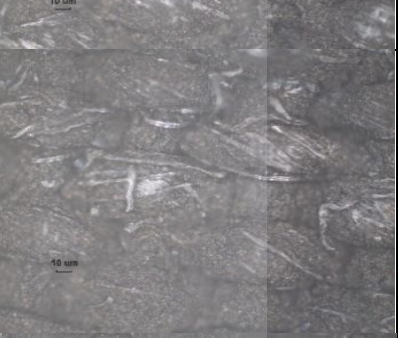






หมายเหตุ: ค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่าที่วัดได้มากกว่า 20000 กิโลโอห์ม ระยะทางที่วัดได้มากที่สุดคือ 0-16 เซนติเมตร จากนั้นระยะทางที่วัดได้ลดลงตามระยะเวลาหลังผ่านการสกรีนที่เพิ่มขึ้น

2.8.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของหมึกที่บ่มเก็บไว้เป็นระยะเวลานานและผ่านการสกรีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

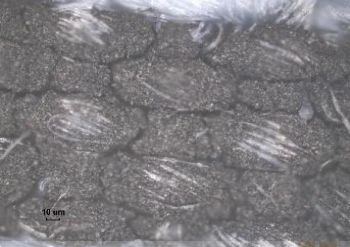

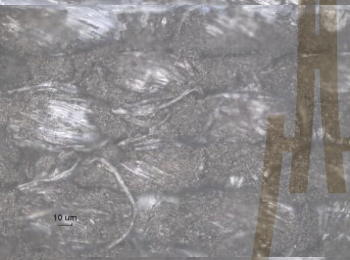
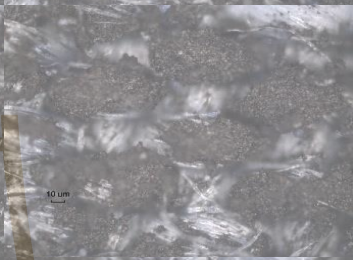

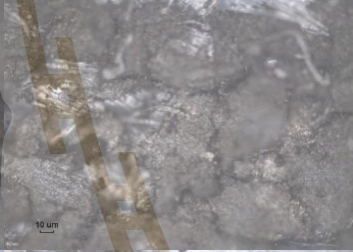




ตารางที่ 2.17 ผลทางกายภาพของหมึกที่บ่มไว้เป็นระยะเวลานานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ของหมึก Gr1PG ที่ผ่านการบ่ม 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน ตามลำดับ

สูตร		จุดที่ไม่ผ่านการวัดค่า	จุดที่ผ่านการวัดค่า
Gr1PG	บ่ม 0 วัน		
	บ่ม 7 วัน		
	บ่ม 14 วัน		
	บ่ม 21 วัน		
	บ่ม 28 วัน		

ตารางที่ 2.18 แสดงผลทางกายภาพของหมึกที่บ่มไว้เป็นระยะเวลานานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ของหมึก กราฟีน Gr2PG ที่ผ่านการบ่ม 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน ตามลำดับ

สูตร		จุดที่ไม่ผ่านการวัดค่า	จุดที่ผ่านการวัดค่า
Gr2PG	บ่ม0วัน		
	บ่ม7วัน		
	บ่ม14วัน		
	บ่ม21วัน		
	บ่ม28วัน		

ตารางที่ 2.19 ผลทางกายภาพของหมึกที่บ่มไว้เป็นระยะเวลานานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ของหมึกกราฟีน Gr3PG ที่ผ่านการบ่ม 0 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, และ 28 วัน ตามลำดับ

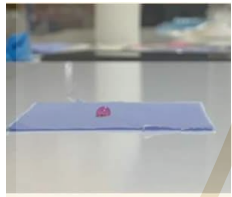
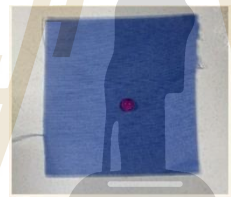
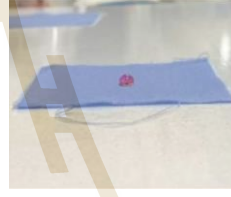
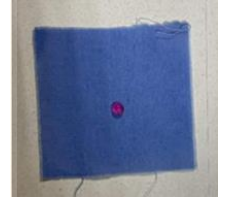






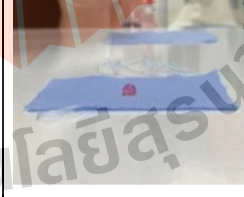

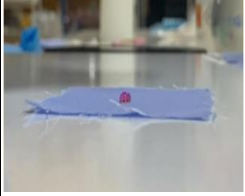

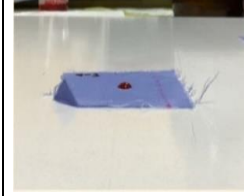

สูตร		จุดที่ไม่ผ่านการวัดค่า	จุดที่ผ่านการวัดค่า
Gr3PG	บ่ม0วัน		
	บ่ม7วัน		
	บ่ม14วัน		
	บ่ม21วัน		
	บ่ม28วัน		

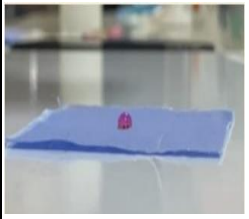
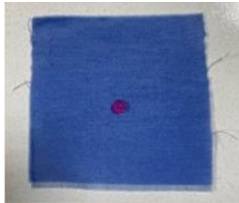


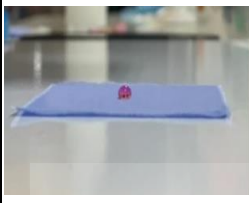

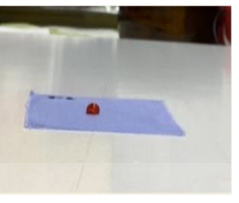


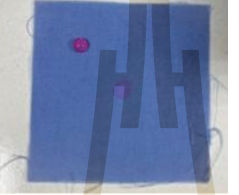
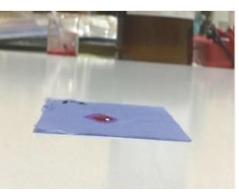
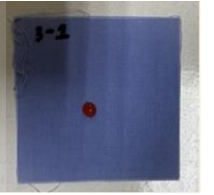
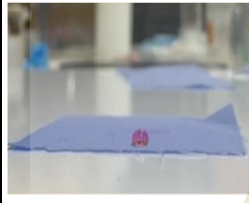

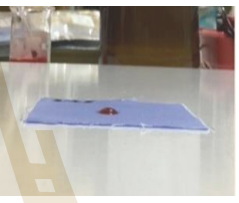



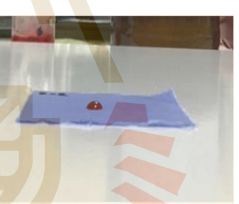
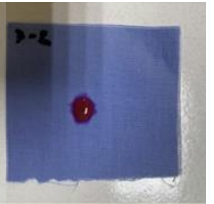
จากผลการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) พบว่าหมึก Gr1PG, Gr2PG และ Gr3PG ระยะเวลาในการบ่ม 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าหมึกที่ผ่านการบ่มไว้เป็นระยะเวลานานและหมึกสูตรที่มีปริมาณกราฟีนมากจะมีพื้นผิวหมึกที่มีลักษณะหนาและเกิดรอยแยกบนพื้นผิวมากกว่าหมึกที่ผ่านการบ่มในระยะเวลาสั้นและที่มีปริมาณกราฟีนน้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างบริเวณที่ผ่านการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและบริเวณที่ไม่ผ่านการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าบริเวณที่ผ่านการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกแต่ละสูตรมีการหลุดร่อนมากขึ้นเมื่อปริมาณกราฟีนมากขึ้น

2.8.5 ผลการเคลือบน้ำ

จากผลการทดสอบความกันน้ำของผ้าที่ผ่านการเคลือบผ้ากันน้ำ โดยทำการเปรียบเทียบก่อนทำความสะอาดและหลังทำความสะอาด ซึ่งทำการทดลองน้ำเคลือบทั้งหมด 3 สูตร ได้แก่ PDMS1, PDMS1.5 และ PDMS2 โดยทำความสะอาดผ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ผ้าเคลือบสามารถยึดเกาะกับผ้าได้ดีขึ้นจากนั้นทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของผ้าก่อนนำไปเคลือบ ซึ่งในการทดลองเคลือบกันน้ำในครั้งแรก พบว่า ผ้าที่มีความเป็นกรดมีความสามารถในการกันน้ำได้สูงกว่าผ้าที่มีความเป็นด่างและกลาง จึงได้ทำการศึกษาต่อโดยทำการเปรียบเทียบความเป็นกรดของผ้าทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ pH=5, pH=6 และ pH=7 ทำการทดลองกับน้ำเคลือบทั้ง 3 สูตร พบว่า ผ้าที่มีความสามารถในการกันน้ำได้สูงที่สุดคือผ้าที่มีความเป็นกรด (pH=5) และ น้ำเคลือบที่มีความสามารถในการกันน้ำสูงที่สุดคือสูตร PDMS2 เนื่องจาก สาร PDMS เป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติกันน้ำจึงส่งผลให้เมื่อเพิ่มปริมาณ PDMS ขึ้นแล้วผ้ามีความสามารถในการกันน้ำสูงขึ้น ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 2.20 ผลการทดสอบความกันน้ำของผ้าที่ผ่านการเคลือบผ้ากันน้ำ

สูตร	ลักษณะหยดน้ำก่อนทำความสะอาด		ลักษณะหยดน้ำหลังทำความสะอาด		
	ภาพจากมุมด้านข้าง	ภาพจากมุมด้านบน	ภาพจากมุมด้านข้าง	ภาพจากมุมด้านบน	
pH=5	PDMS1				
	PDMS1.5				
	PDMS2				
pH=6	PDMS1				

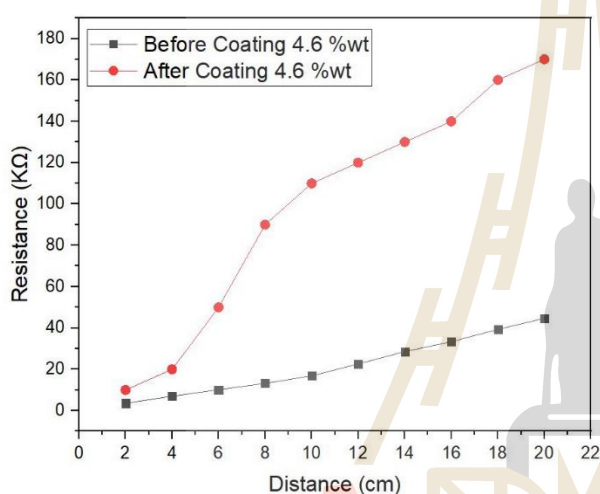
	PDMS1.5				
	PDMS2				
pH=7	PDMS1				
	PDMS1.5				
	PDMS2				

2.8.6 ผลการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าของวงจรถักที่ผ่านการเคลือบสารกันความชื้น



รูปที่ 2.41 ตัวอย่างชิ้นงานการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าของวงจรถักที่ผ่านการเคลือบสารกันความชื้น

จากการทดสอบเคลือบผ้าด้วยสารเคลือบกันความชื้นหรือกันน้ำ โดยปิดบริเวณที่ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเพื่อป้องกันน้ำเคลือบไม่ให้โดนบริเวณจุดที่จะทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแล้วทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างก่อนเคลือบและหลังเคลือบ พบว่า ทั้งบริเวณที่ปิดป้องกันน้ำเคลือบและไม่ได้ปิดป้องกันน้ำเคลือบ ผ้ามีคุณสมบัติกันน้ำได้เช่นเดียวกันนั้นหมายความว่าน้ำเคลือบสามารถซึมไปตามเส้นใยของผ้าทำให้ผ้าถูกเคลือบไว้ทั่วทุกบริเวณและเมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างก่อนเคลือบและหลังเคลือบ พบว่า หลังผ่านการเคลือบค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานไฟฟ้าก่อนทำการเคลือบนั้นหมายความว่าสารเคลือบผ้ากันน้ำที่ผลิตขึ้นส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยเมื่อทำการเคลือบลงบนหมึกนำไฟฟ้าแล้วทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 ผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อผ่านและไม่ผ่านการเคลือบสารกันความชื้น

2.9 สรุปผลการทดลองตอนที่ 2

การวิจัยและทดลองเพื่อหาปริมาณสารเชื่อมประสาน ที่เหมาะสมเมื่อผสมสาร binder ในปริมาณสัดส่วนต่างๆแล้ว ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน พบว่า สารผสมที่ผสมไว้ 7 วัน สูตร PG1 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด เมื่อนำสูตรของ binder มาผสมกับกราฟีนในสัดส่วนต่างๆ ได้เป็นหมึกนำไฟฟ้าแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน พบว่า หมึกที่บ่มไว้ 14 วัน สูตร ที่เติม Gr1PG มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด และเมื่อสกรีนหมึกลงบนผ้าและวัดค่าความต้านทานเมื่อระยะเวลาผ่านไป 0, 7, 14, 21 และ 28 วันตามลำดับ พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกที่ผ่านการสกรีนมีค่าความต้านทานที่เพิ่มสูงขึ้นตามเวลาที่ผ่านการสกรีน

คุณสมบัติเคลือบกันความชื้นหรือของเหลว เมื่อทำการเคลือบลงบนผ้าที่ผ่านการ treatment พบว่า เคลือบสูตร PDMS2 สามารถกันน้ำดี น้ำไม่ซึมลงบนผ้า เมื่อนำผ้าที่ผ่านการเคลือบแล้วนำไปซัก พบว่า เคลือบสูตร PDMS2 ยังคงสภาพความต้านทานน้ำได้ดีที่สุด เมื่อนำสูตรเคลือบกันน้ำไปทำการเคลือบทับบนเส้นวงจรหมึกนำไฟฟ้า พบว่าไม่มีการหลุดร่อนของหมึกและมีสมบัติกันน้ำ แต่ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าวงจรที่ไม่ได้ทำการเคลือบ เนื่องจากสารที่ใช้ในการเคลือบซึมผ่านเส้นใยของผ้า ทำให้เส้นของหมึกนำไฟฟ้าที่ผ่านการสกรีนถูกสารเคลือบเคลือบไว้

บทที่ 3 อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ ด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า

บทนี้ นำเสนอการออกแบบขั้นตอนวิธีการเก็บผลของเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับจากหมึกนำไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนในการนำเข้ามาหมึกนำไฟฟ้าจากต่างประเทศซึ่งมีต้นทุนที่สูง เพื่อนำมาสร้างเซ็นเซอร์ ทั้งนี้ การพัฒนาเซ็นเซอร์หมึกนำไฟฟ้า ศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเซ็นเซอร์ที่มักใช้หมึกที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีคุณสมบัติ Piezoresistive เมื่อออกแรงกดบนพื้นผิวของหมึก ความต้านทานของหมึกจะเปลี่ยนไปตามแรงกด ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนไป วงจรอ่านค่าจะวัดแรงที่ใช้โดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานและค่าแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ เซ็นเซอร์ใช้การผสมผสานทั้งระหว่างหมึกคาร์บอนที่ไม่นำไฟฟ้าและและนำไฟฟ้าได้ดี เพื่อช่วยให้สามารถควบคุมและปรับความต้านทานไฟฟ้าได้ ส่วนใหญ่ อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับในงานวิจัยที่ผ่านมา จะประกอบด้วยชั้นสเตรตพลาสติก PET สามชั้นซ้อนกัน ชั้นบนสุดถูกพิมพ์สกรีนด้วยแถบหมึกนำไฟฟ้า เพื่อสร้างอิเลกโทรดนำไฟฟ้า ในขณะที่ชั้นล่างสุดถูกพิมพ์เพื่อตรวจจับแรงกด และมีชั้นกาวระหว่างชั้นบนและชั้นล่างทำหน้าที่เป็น spacer หรือวัสดุคั่นกลาง

ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ โดยออกแบบให้วางหมึกนำไฟฟ้า บนชั้นเดียวกัน ทั้งนี้ รายละเอียดวงจรอิเลกทรอนิกส์ที่ใช้ในการเรียกข้อมูล Data Acquisition จากเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับที่นำเสนอ และ แอปพลิเคชันแสดงผลวัดแรงกดทับ ด้วย MIT APP INVENTOR อยู่ในภาคผนวก ก โดยมีวัตถุประสงค์ ในการทดลองดังนี้

3.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำหมึกนำไฟฟ้าที่พัฒนาได้มาประกอบเป็นอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ โดยออกแบบให้แถบหมึกไฟฟ้าอยู่ด้านเดียวกันเพื่อความสะดวกในการจัดวางเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบน ผ้า
2. เพื่อนำอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้ามาทดสอบคุณสมบัติเซ็นเซอร์ ในภาวะสัญญาณรบกวนระหว่างจุดน้อย โดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักวางที่ละจุด
3. เพื่อนำอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้า มาทดสอบคุณสมบัติเซ็นเซอร์ ในภาวะมีสัญญาณรบกวน โดยใช้เครื่องวัด Universal Testing Machine (UTM) ที่หลายๆจุด

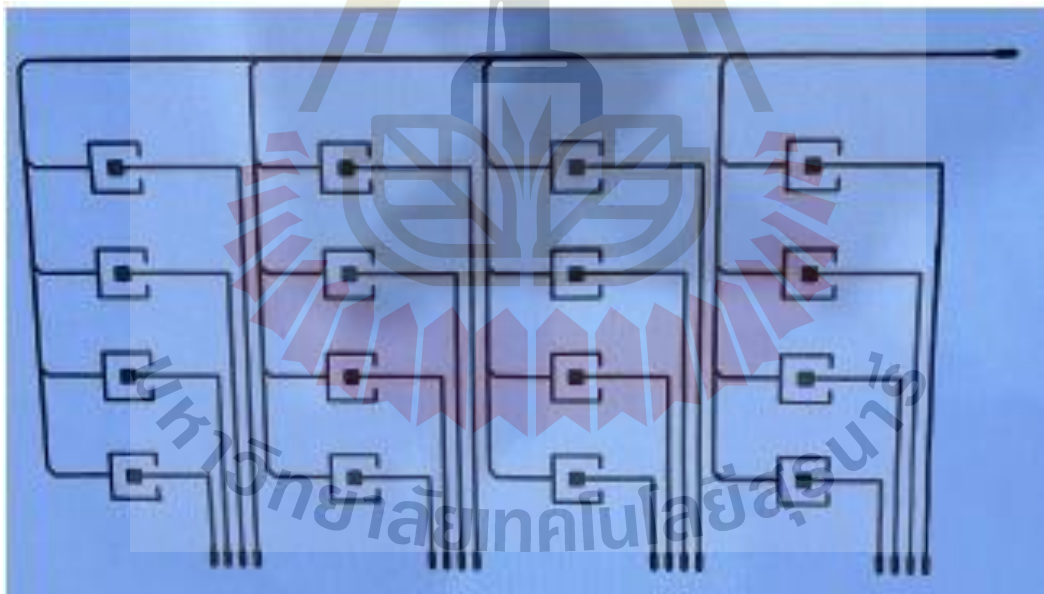
ทั้งนี้ ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ในเว็รวัดแรงกดทับ แบ่งเป็น 2 การทดลอง ที่ใช้หมึกนำไฟฟ้าที่พัฒนาจากบทที่แล้ว 2 ชุด ได้แก่

1. หมึกนำไฟฟ้าที่ใช้เวลาในการบ่มหมึกทั้งหมด 7 วัน

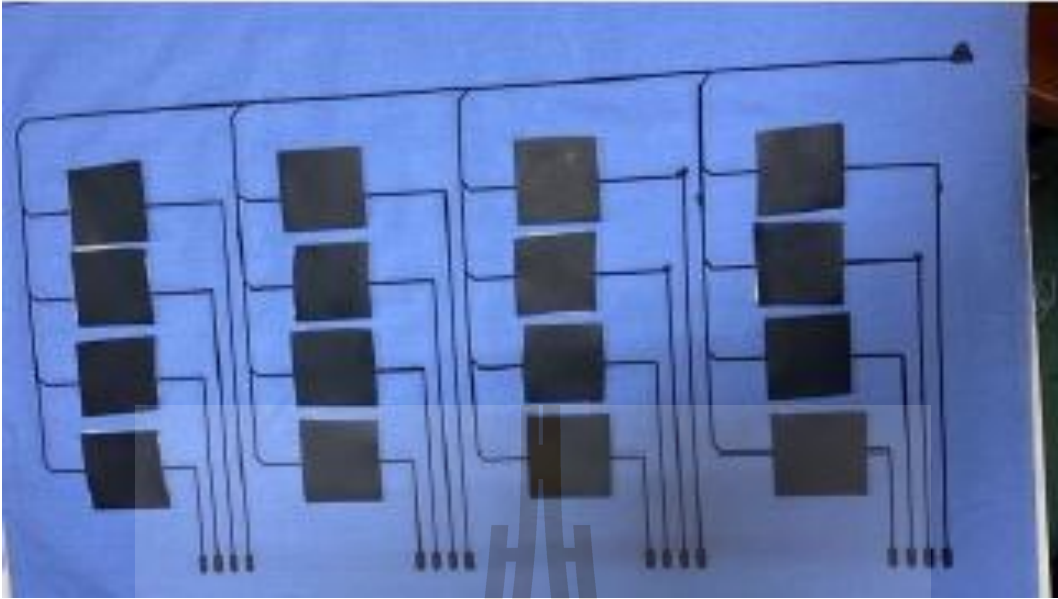
2. หมึกนำไฟฟ้าที่ใช้เวลาในการบ่มหมึกทั้งหมด 14 วัน

3.2 การประกอบอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ ด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า

เซ็นเซอร์ที่นำเสนอใช้ คุณสมบัติ Piezoresistive elastomer ของวัสดุที่มีคาร์บอน ที่มีชื่อเสียงทางการค้า (Velostat) เมื่อมีแรงกดทับ บนพื้นผิวของวัสดุดังกล่าว ความต้านทานของวัสดุ เปลี่ยนแปลงไปตามแรงที่กด โดยขนาดแรงกดที่ใช้สามารถวัดได้จากวงจรอ่านค่าที่ติดตามการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของวัสดุ piezoresistive ทั้งนี้ อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ ประกอบด้วยชั้นสเตรตผ้าด้านล่างสุด แลบบ่มึกนำไฟฟ้า แผ่น spacer ซึ่งเป็นแผ่นพลาสติก PET วางอยู่คั่นกลางเป็นชั้นบัฟเฟอร์ระหว่างแลบบ่มึก โดยใช้วิธีการเป็นการพิมพ์สกรีนเพื่อสร้างอิเล็กทรอนิกส์นำไฟฟ้าในขณะที่แผ่น Piezoresistive elastomer ถูกวางลงบนชั้นบนสุด ซึ่งให้ความสามารถในการรับรู้แรงกด ชั้นบนสุดอาจเป็นแผ่นพลาสติกหรือ ชั้นกาวถูกประกบไว้ ดังรูป 3.1-3.2 จากนั้นนำอาร์เรย์เซ็นเซอร์ดังกล่าวเชื่อมต่อกับวงจร Data Acquisition ตามภาคผนวก ก งานวิจัยนี้ เลือกวิธีการพิมพ์สกรีนด้วยเป็นวิธีการที่มีต้นทุนที่คุ้มค่าสำหรับการผลิตเซ็นเซอร์พื้นที่ขนาดใหญ่



รูปที่ 3.1 การสกรีน แบบลายวงจร ด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า



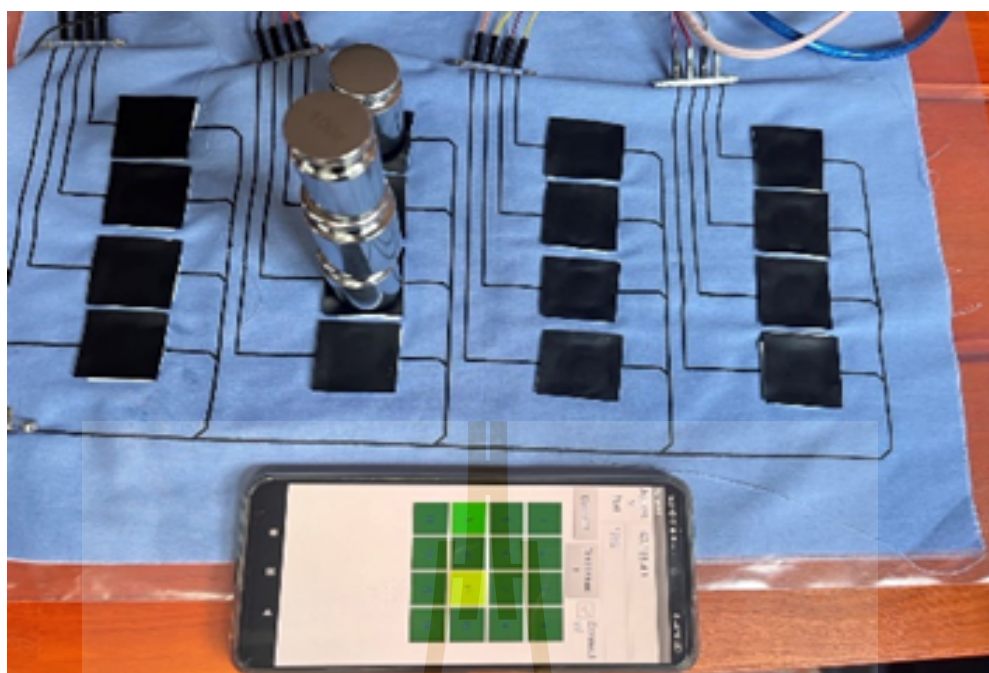
รูปที่ 3.2 การวาง spacer และแผ่น piezoresistive elastomer บนแบบลายวงจร สกรีนด้วยหมึกนำไฟฟ้า บนผ้า

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้า โดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก

การทดลองนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อนำอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้าที่ประกอบขึ้น มาทดสอบคุณสมบัติ เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับในภาวะสัญญาณรบกวนระหว่างจุดน้อยโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักวางทีละจุด และวัดอายุของหมึกนำไฟฟ้าต่อคุณสมบัติของเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ

ในการทดลองนี้ ใช้อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้า ขนาด 4 x 4 เชื่อมต่อกับ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ออกแบบ มาด้วย connector เพื่อวัดค่า analog to digital converter (ADC) โดยใช้ตุ้มน้ำหนัก น้ำหนักที่ใช้ในการ ทดลอง 100 – 1,000 กรัม และแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันโทรศัพท์มือถือ ดังนี้

- 1) วางตุ้มน้ำหนักลงบนเซนเซอร์ โดยเริ่มต้นที่ 100 กรัม
- 2) เพิ่มน้ำหนักครั้งละ 100 กรัม จนถึงน้ำหนัก 1,000 กรัม
- 3) สังเกตค่าเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าและบันทึกผล
- 4) ทำการทดลองซ้ำ โดยเว้นระยะเวลาทุก 3 วัน เป็นระยะเวลา 12 วัน



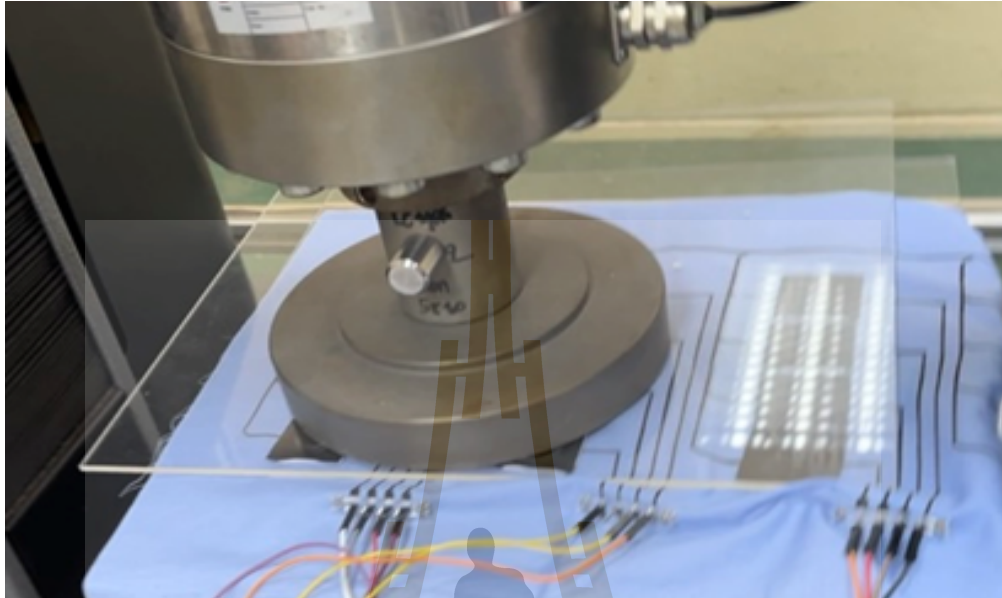
รูปที่ 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้า โดยใช้ Universal Testing Machine (UTM)

วัดด้วยอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ มีปัญหาด้านสัญญาณรบกวน ซึ่งมาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลมาจากเซ็นเซอร์อื่นๆ ที่อยู่ในแถวหรือคอลัมน์ใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์ที่ได้รับแรงกดทับ การทดลองนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ทดสอบคุณสมบัติของอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ เมื่อหลายๆเซ็นเซอร์ถูกกดพร้อมๆกันหลายๆจุด โดยนำอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้าที่ประกอบขึ้น ขนาด 4x4 มาเชื่อมต่อกับวงจร Data Acquisition ผ่าน connector และวัดค่า analog to digital converter (ADC) โดยใช้แรงกดทับด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (F5) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใช้แรงกดทับ ที่ใช้ในการทดลองขนาด 100 – 1,000 นิวตัน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) วางแรงกดน้ำหนักลงบนเซนเซอร์เริ่มต้นที่ 1,000 นิวตัน
- 2) เพิ่มน้ำหนักครั้งละ 100 นิวตัน จนถึงน้ำหนัก 1,000 นิวตัน
- 3) สังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าและบันทึกผล

4) ทำการทดลองซ้ำ โดยเว้นระยะเวลาทุก 3 วัน เป็นระยะเวลา 12 วัน

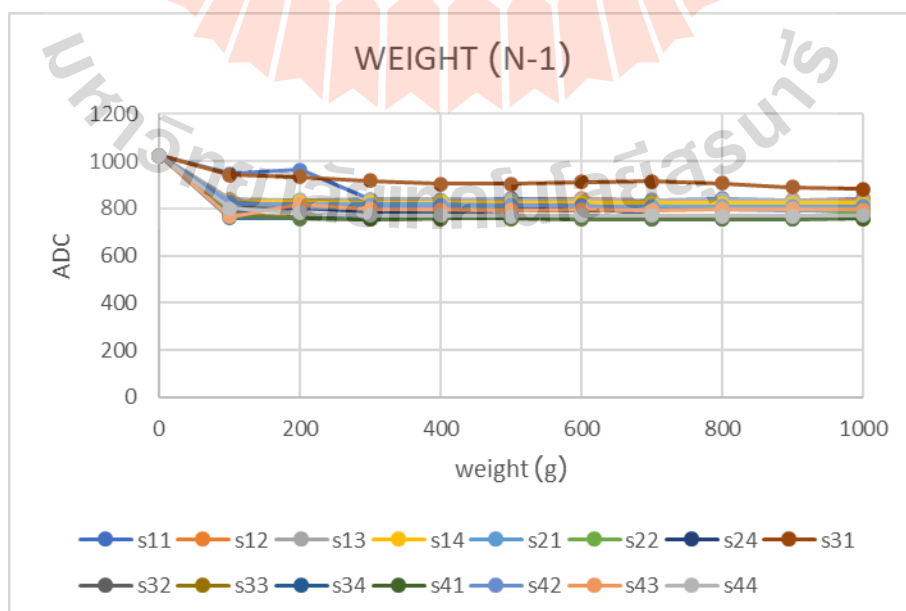


รูปที่ 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

3.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับบนผ้าของหมึกนำไฟฟ้า

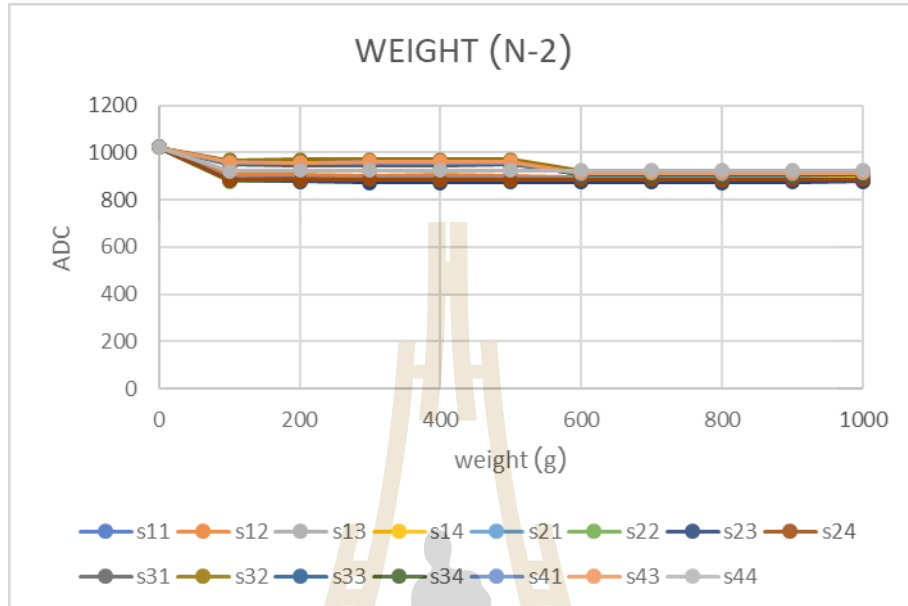
3.5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก

3.5.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักใช้หมึกนำไฟฟ้า สูตรบ่ม 7 วัน



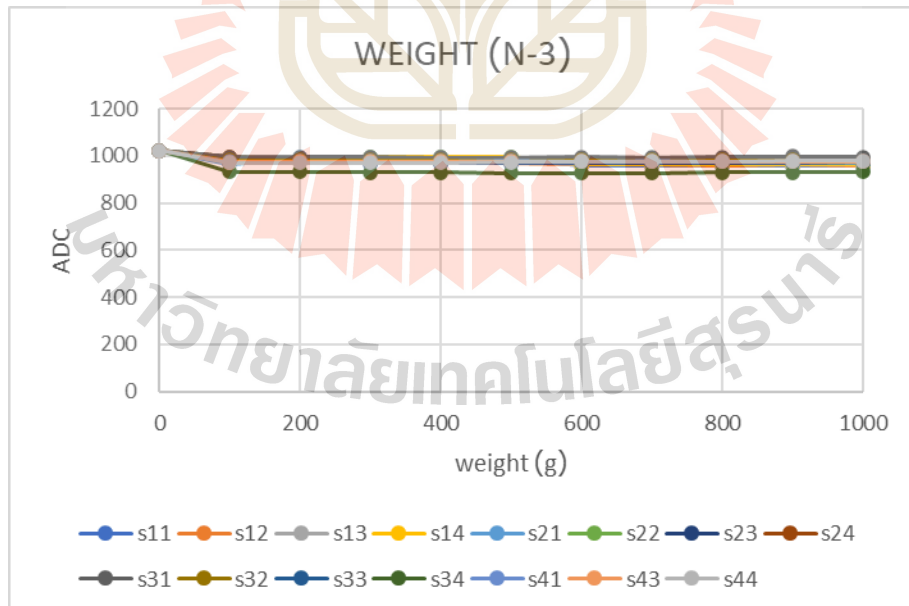
รูปที่ 3.5 ผลการวัดจากตุ่มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 1

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



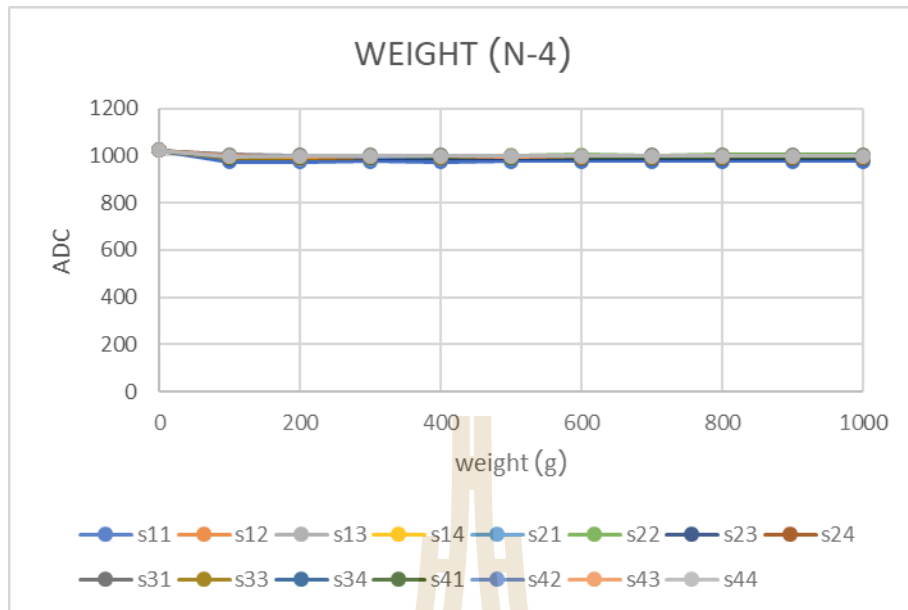
รูปที่ 3.6 ผลการวัดจากตุ่มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 2

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



รูปที่ 3.7 ผลการวัดจากตุ่มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 3

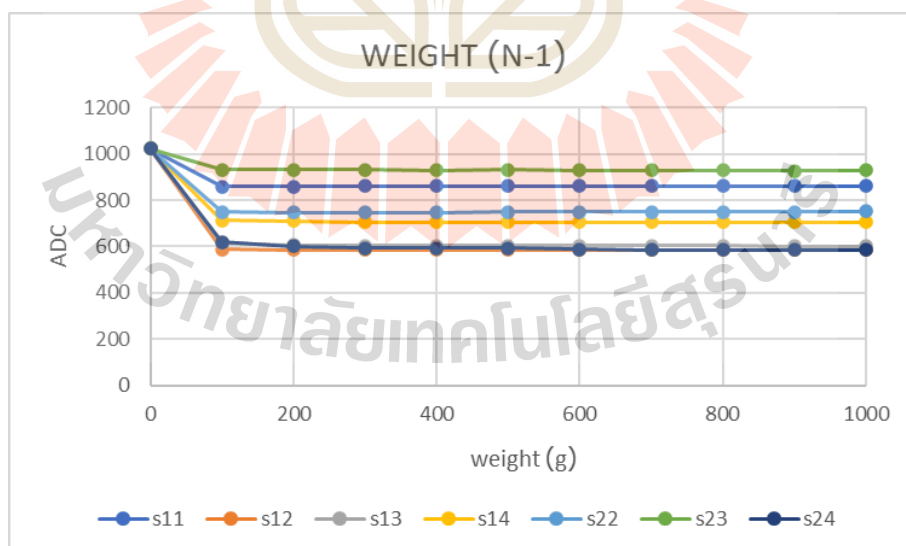
*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



รูปที่ 3.8 ผลการวัดจากตุ้มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 4

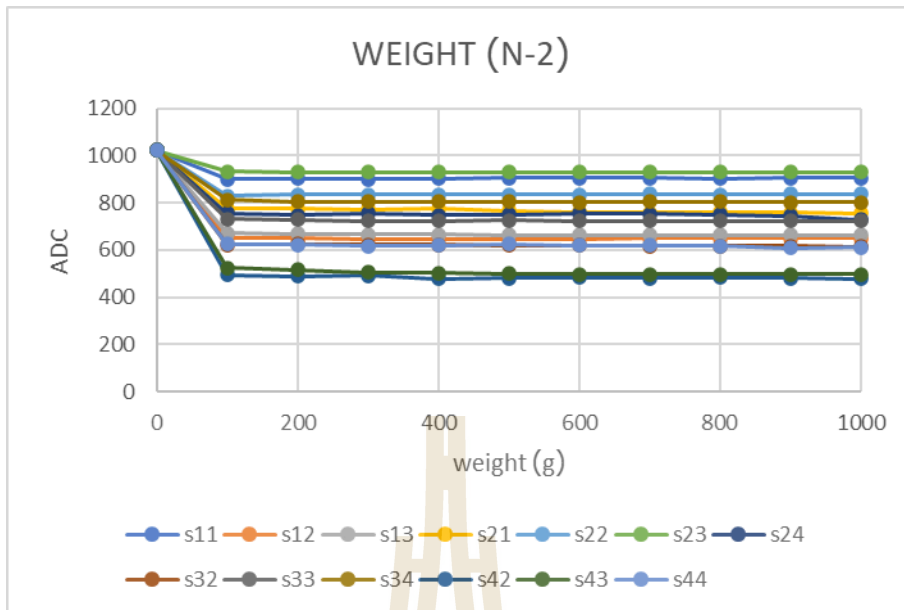
*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง

3.5.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักใช้หมึกนำไฟฟ้า สูตรบ่ม 14 วัน



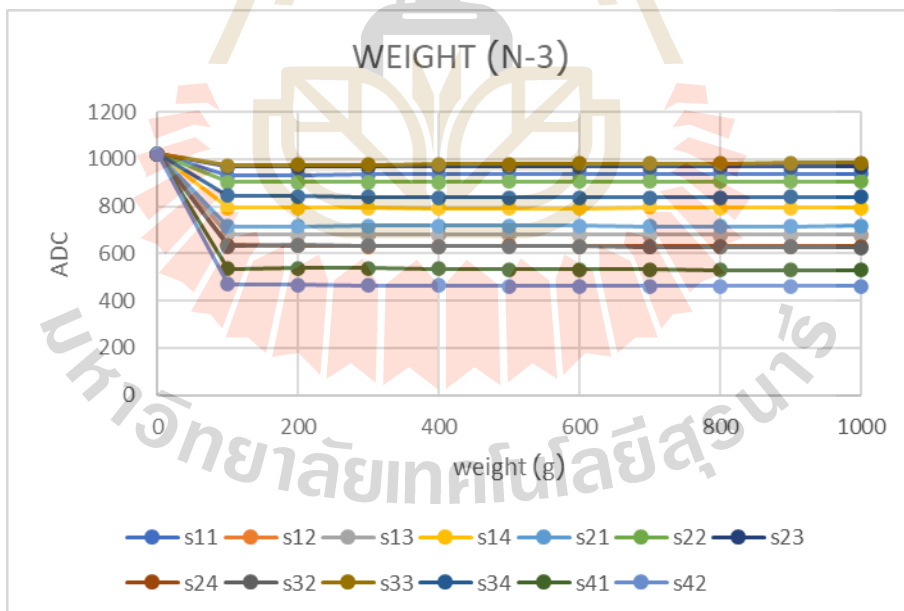
รูปที่ 3.9 ผลการวัดจากตุ้มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 1

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



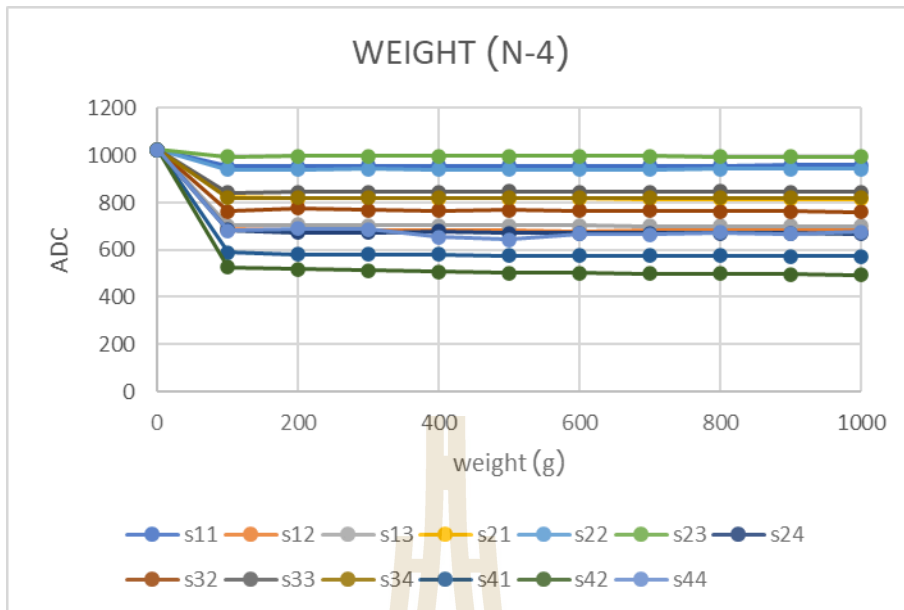
รูปที่ 3.10 ผลการวัดจากตุ้มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 2

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



รูปที่ 3.11 ผลการวัดจากตุ้มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 3

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง

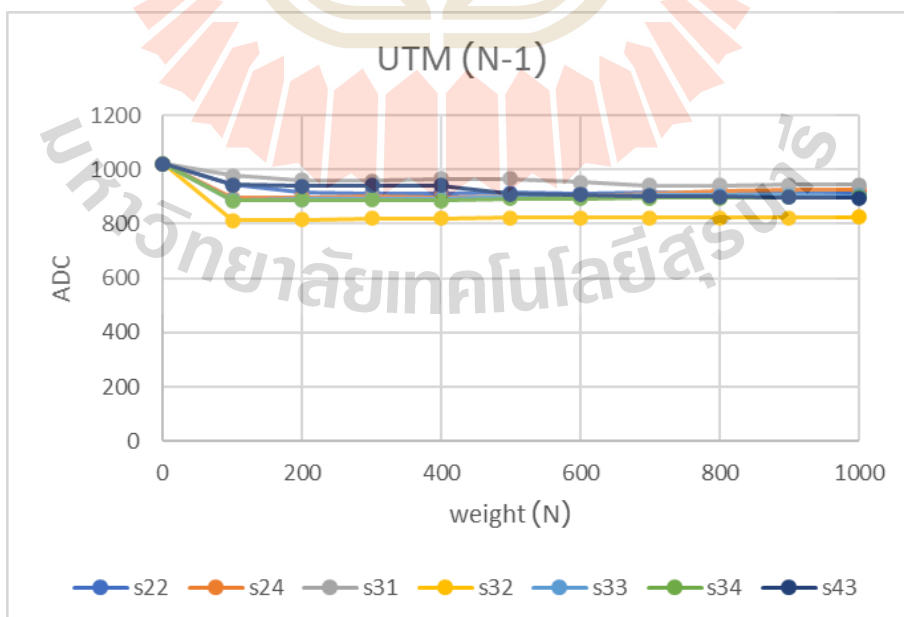


รูปที่ 3.12 ผลการวัดจากตุ้มน้ำหนัก (หมึกบ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 4

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง

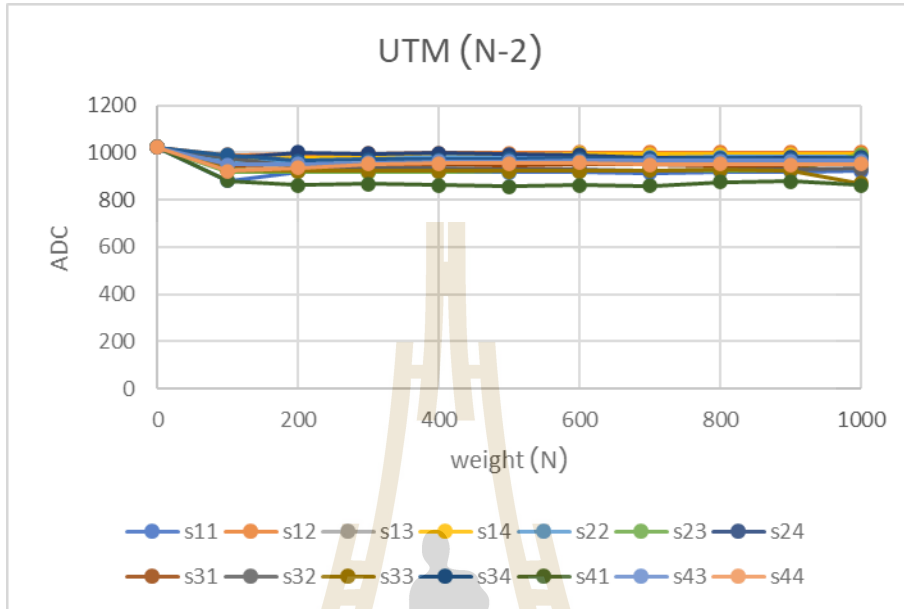
3.5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ Universal Testing Machine (UTM)

3.5.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ UTM ใช้หมึกนำไฟฟ้า สูตรบ่ม 7 วัน



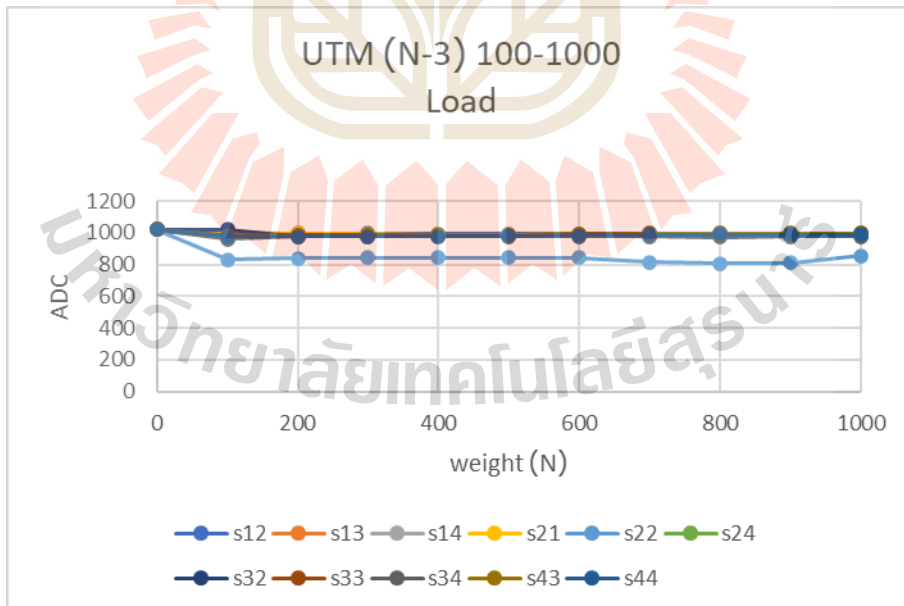
รูปที่ 3.13 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 1

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



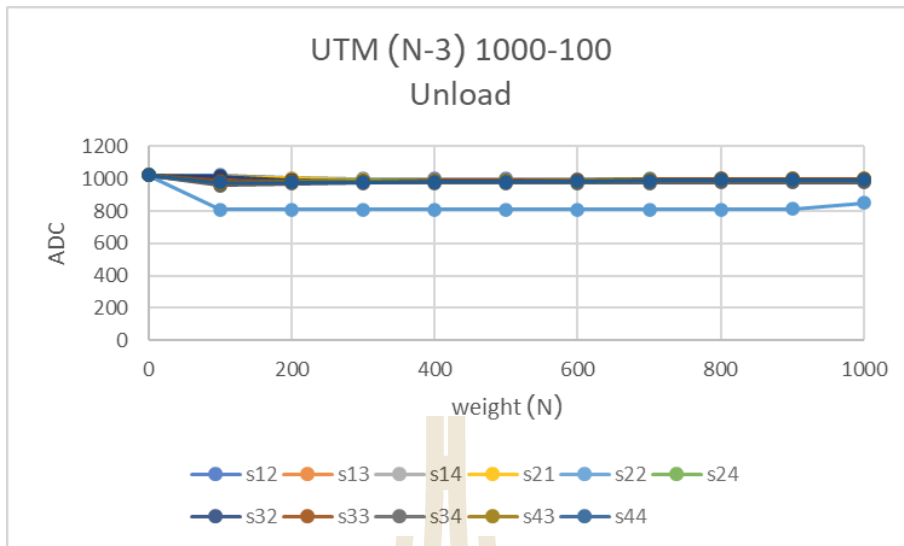
รูปที่ 3.14 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 2

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



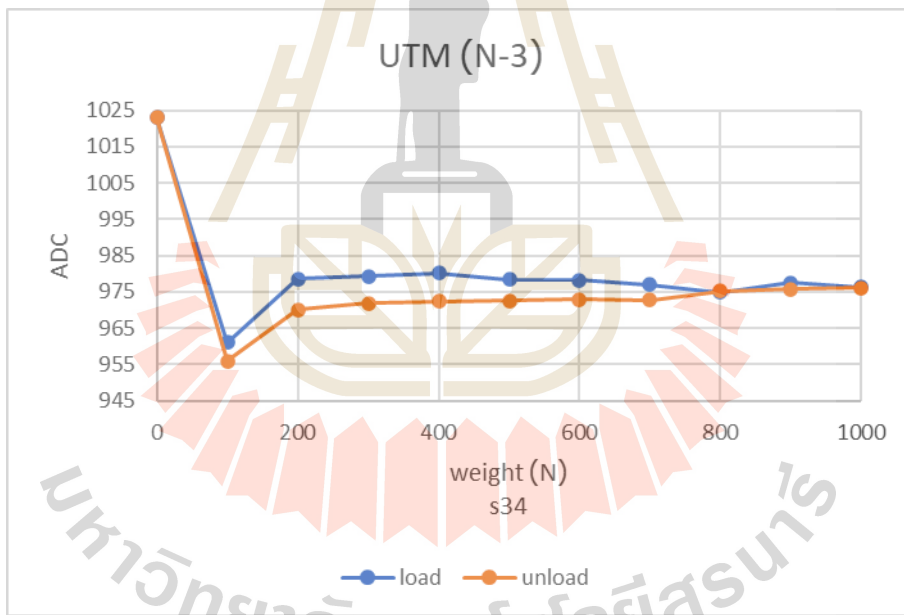
รูปที่ 3.15 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (หมึกบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 3

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



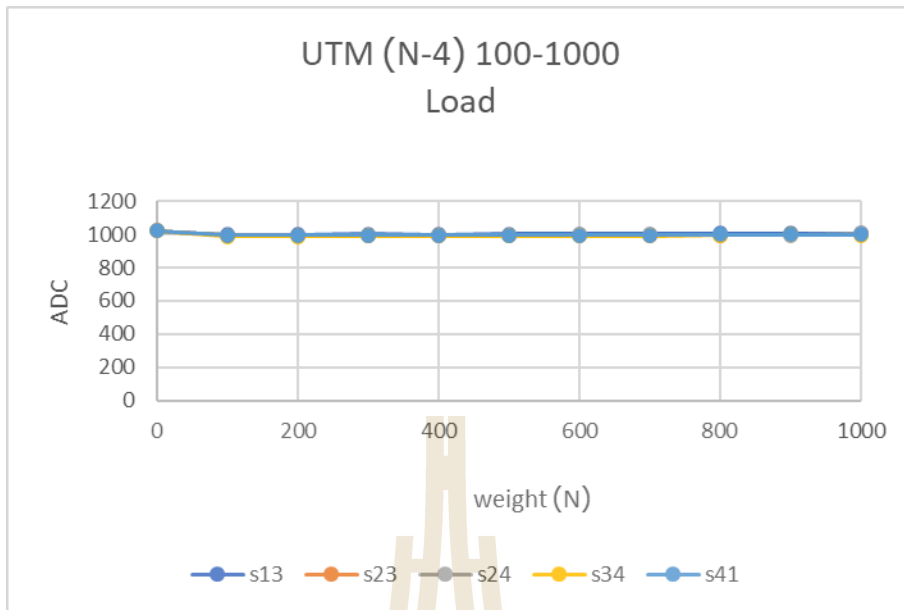
รูปที่ 3.16 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (หมักบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 3

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



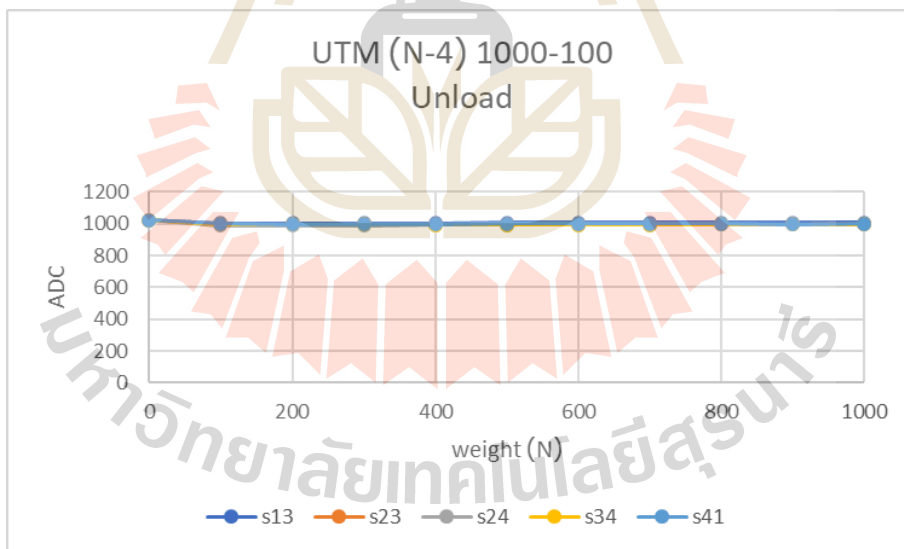
รูปที่ 3.17 ผลการวัดเปรียบเทียบการยืดหยุ่นของเซนเซอร์ UNIVERSAL TESTING MACHINE

(หมักบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 3 *โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



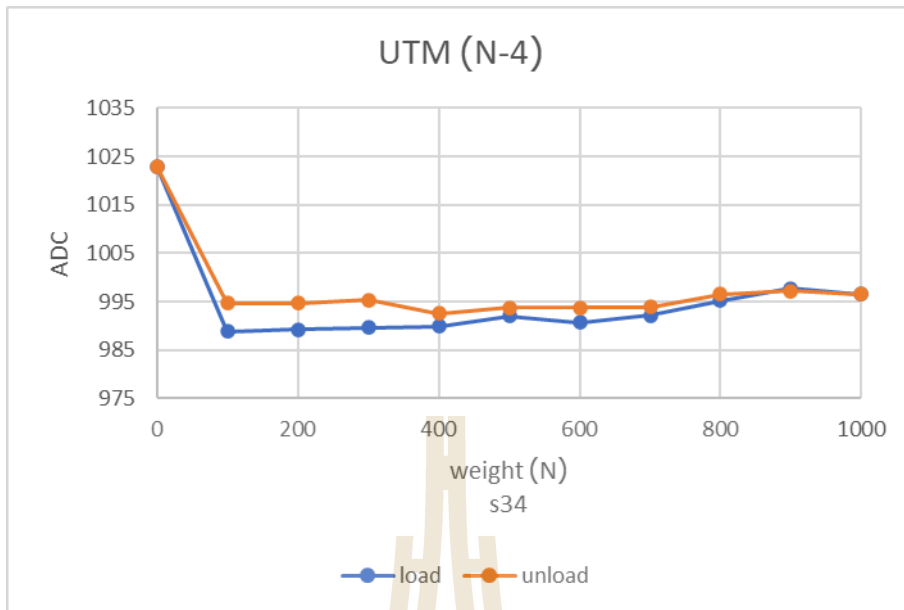
รูปที่ 3.18 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (หมักบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 4

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



รูปที่ 3.19 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (หมักบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 4

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง

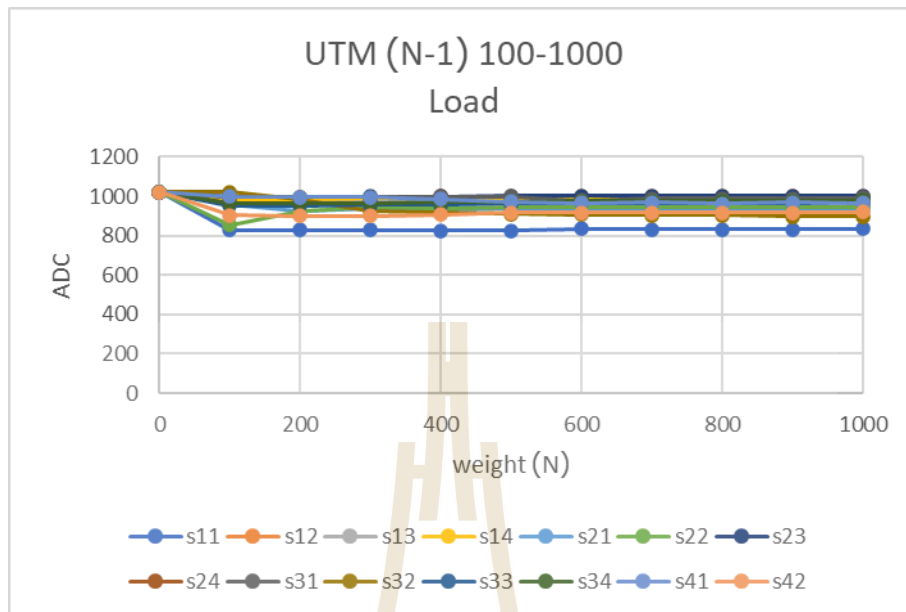


รูปที่ 3.20 ผลการวัดเปรียบเทียบการยืดหยุ่นของเซนเซอร์ UNIVERSAL TESTING MACHINE

(หมักบ่ม 7 วัน) วัดครั้งที่ 4 *โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง

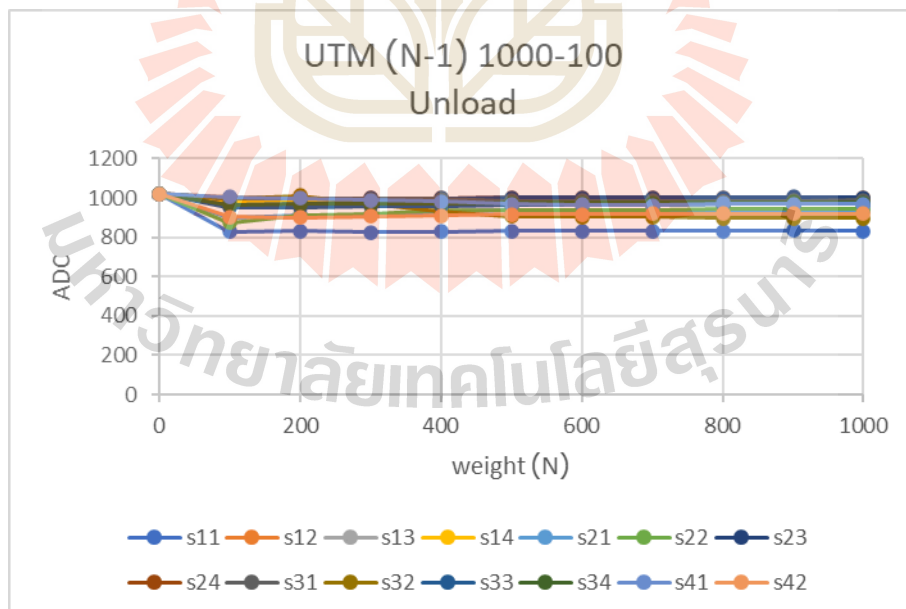


3.5.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้ UTM ใช้หมึกนำไฟฟ้า สูตรบ่ม 14 วัน



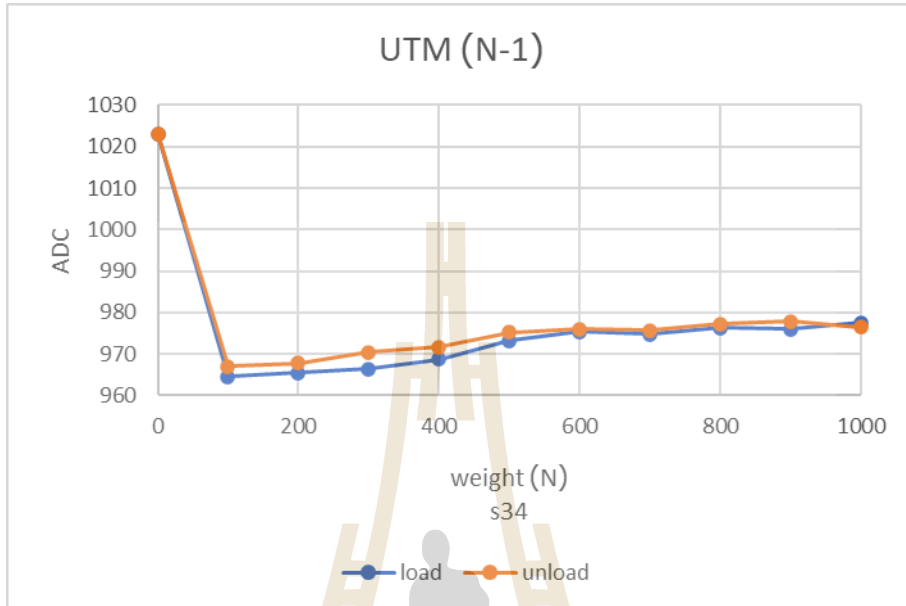
รูปที่ 3.21 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (บ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 1

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



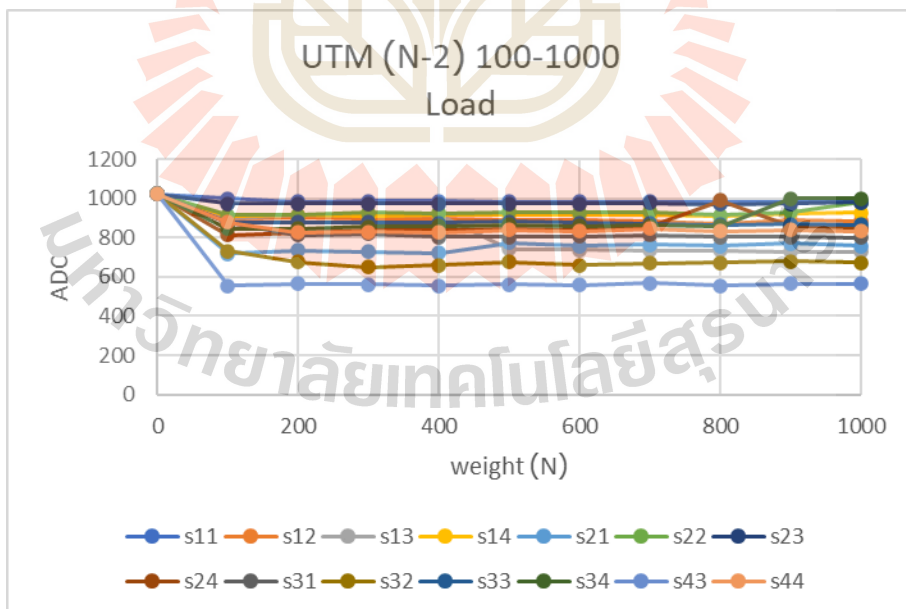
รูปที่ 3.22 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (บ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 1

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



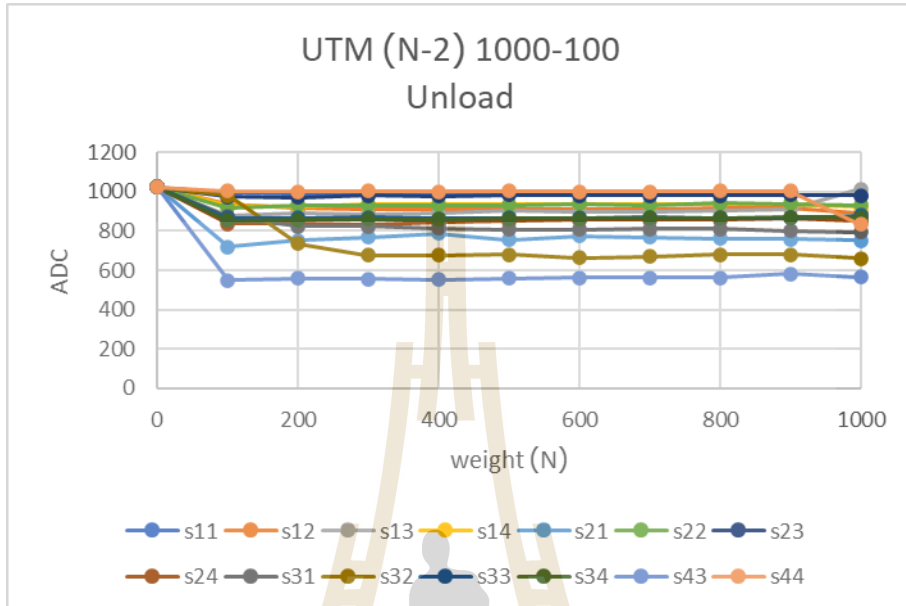
รูปที่ 3.23 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (หมักบ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 1

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง

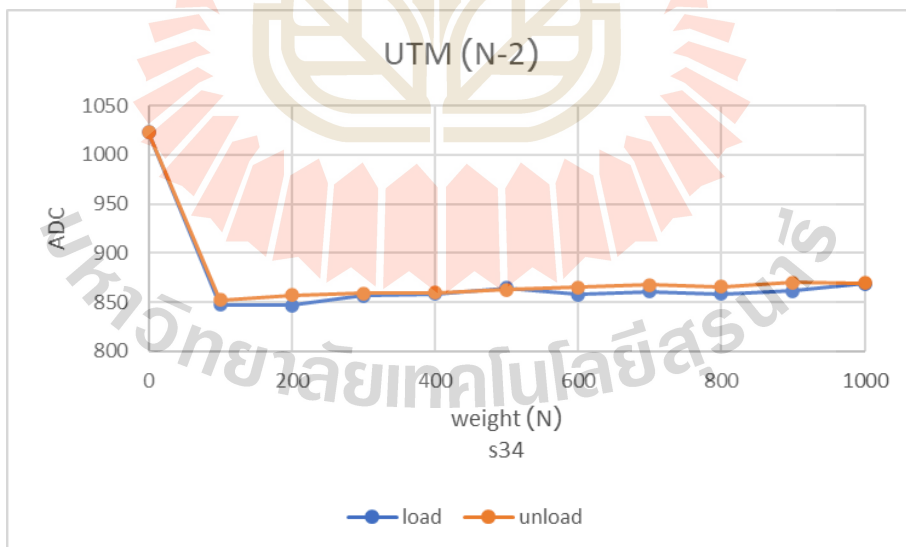


รูปที่ 3.24 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (บ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 2

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง

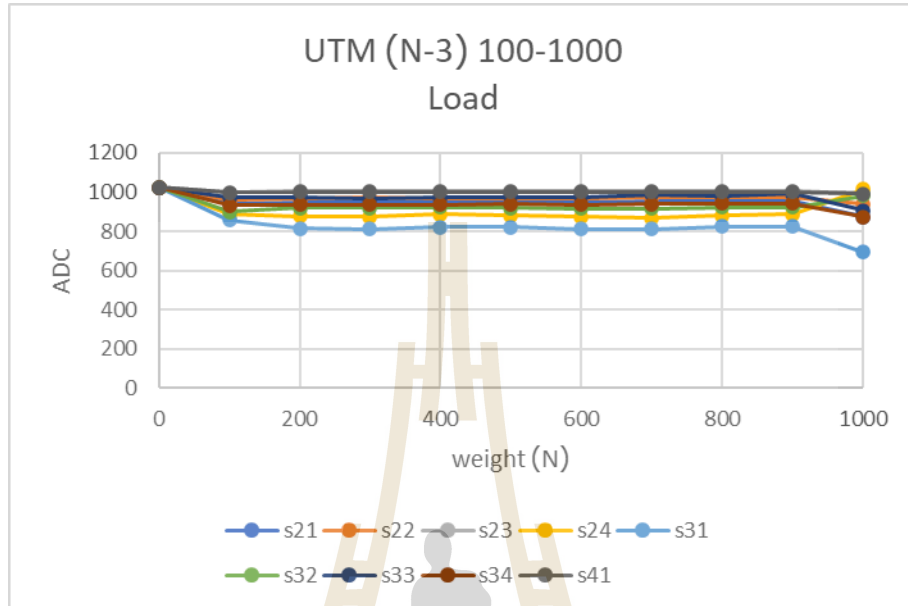


รูปที่ 3.25 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (บ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 2
*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



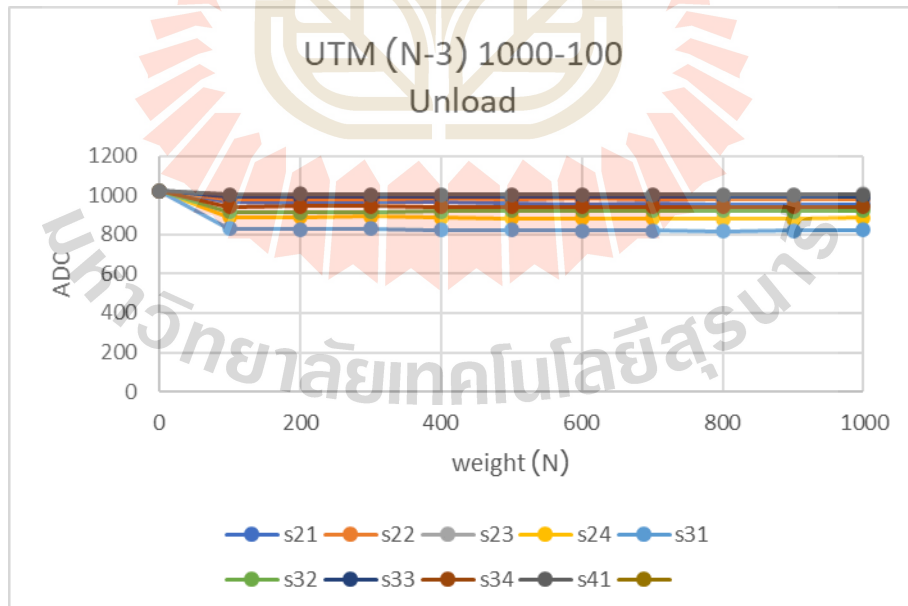
รูปที่ 3.26 ผลการวัดเปรียบเทียบการยืดหยุ่นของเซนเซอร์
UNIVERSAL TESTING MACHINE (หมักบ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 2

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



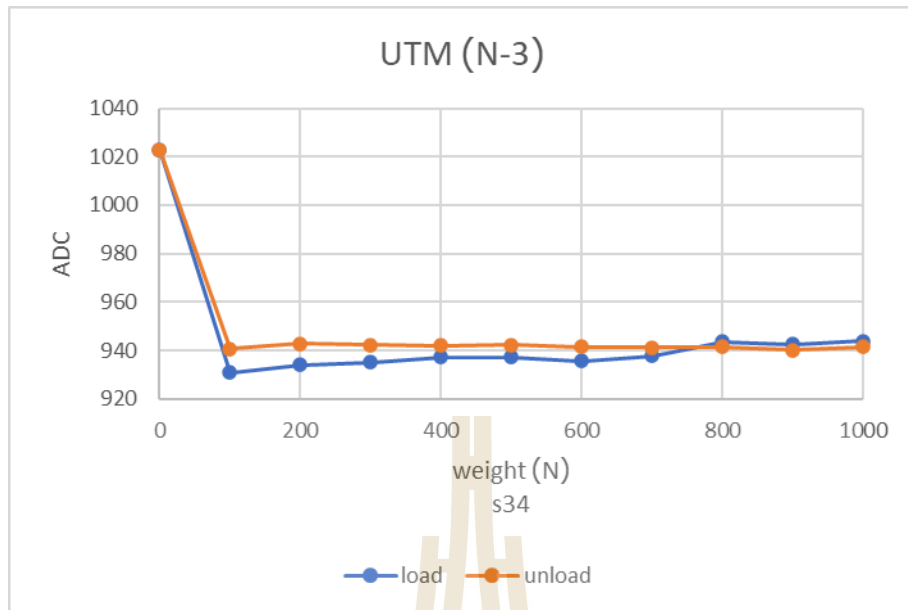
รูปที่ 3.27 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (บ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 3

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



รูปที่ 3.28 ผลการวัด UNIVERSAL TESTING MACHINE (บ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 3

*โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง



รูปที่ 3.29 ผลการวัดเปรียบเทียบการยืดหยุ่นของเซ็นเซอร์ UNIVERSAL TESTING MACHINE

(หมึกบ่ม 14 วัน) วัดครั้งที่ 3 *โดยเว้นช่วงการวัด 3 วันต่อ 1 ครั้ง

3.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ในการทดสอบคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้แรงกดจากตุ้มน้ำหนัก ขนาด 100-1000 กรัม และใช้แรงกดจากเครื่อง Universal Testing Machine ขนาด 100-1000 นิวตัน พบว่าก่อนที่ใช้แรงกดจากตุ้มน้ำหนักค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าปกติคงที่ แต่เมื่อใช้แรงกดจากตุ้มน้ำหนัก โดยเริ่มต้นใช้น้ำหนักที่ 100 กรัม ค่าแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดลง และเมื่อเพิ่ม น้ำหนักไปเรื่อยๆ ค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงตามน้ำหนักและคงที่ สำหรับผลการทดลองของการใช้แรงกดจากเครื่อง Universal Testing Machine เมื่อเครื่องออกแรงกดเริ่มต้นที่ 100 นิวตัน ค่าแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดลง และเมื่อเพิ่มแรงกดจากเครื่อง Universal Testing Machine ไปเรื่อยๆ ค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงและคงที่

จากผลการทดลองเซ็นเซอร์วัดแรงกดทับโดยใช้หมึกนำไฟฟ้าต้นทุนต่ำ แสดงให้เห็นว่าแรงกดทับลงบนตัวเซ็นเซอร์ค่าความแรงดันไฟฟ้าจะลดลงและคงตัว ซึ่งบ่งบอกสถานะ on-off ของเซ็นเซอร์ได้ เมื่อมีแรงกดทับ อาจเหมาะกับการประยุกต์ใช้งาน เช่น สามารถตรวจจับการตกเตียงของผู้ป่วยได้ โดยเมื่อผู้ป่วยนอนบนเตียงจะเกิดแรงกดทับทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง แสดงให้เห็นว่าผู้ป่วยอยู่บนเตียง แต่ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในแนวโน้มที่ลดลงนั้นหมายความว่าผู้ป่วยไม่ได้อยู่บนเตียงเป็นต้น

บทที่ 4 สรุป

4.1 การออกแบบหมึกนำไฟฟ้าเพื่อทดแทนหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในท้องตลาด

ตอนที่ 1 งานวิจัยนี้ ได้ออกแบบหมึกนำไฟฟ้าชนิดกราฟีน เพื่อใช้สำหรับการสกรีนปรินต์ติ้ง (screen printing) ลงบนพื้นผิวที่เป็นผ้าเพื่อสร้างเป็นวงจรไฟฟ้า โดยได้ศึกษาค่าความต้านทานที่ได้จากหมึกนำไฟฟ้าที่มาจาก การออกแบบสูตรต่างๆ ในรูปแบบการสกรีน 3 ชั้น และวิเคราะห์ลักษณะการยึดเกาะของหมึกที่ถูกสกรีนลงบนผ้าต่อผลของค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่า WVA2X เพราะ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำและมีการยึดติดที่ดี หมึกนำไฟฟ้าสามารถเคลือบบนผิวของเส้นใยผ้าคอตตอนได้ดี คือ หมึกนำไฟฟ้าสูตร NMPAC₂3Y ที่ใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย และใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC2 ปริมาณ 3Y จะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงหมึกทางการค้ามากที่สุด เมื่อเทียบกับหมึกสูตรอื่น เมื่อเทียบกับหมึกนำไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ Haydale SYNERG Graphene Ink P080 (Commercial)

ตอนที่ 2 การวิจัยและทดลองเพื่อหาปริมาณ GOPS ที่เหมาะสมเมื่อผสมสาร GOPS ในปริมาณสัดส่วนต่างๆ แล้ว ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน สูตร ที่เติม Graphene 1.5%wt มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด และเมื่อสกรีนหมึกลงบนผ้าและวัดค่าความต้านทานเมื่อระยะเวลาผ่านไป 0, 7, 14, 21 และ 28 วันตามลำดับ พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกที่ผ่านการสกรีนมีค่าความต้านทานที่เพิ่มสูงขึ้นตามเวลาที่ผ่านการสกรีน ดังนั้นจากการศึกษาอายุการเก็บรักษาของหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมจากกราฟีน จึงไม่ควรเกิน 14 วัน นอกจากนี้ จากศึกษาวิธีการเคลือบผ้า เพื่อการป้องกันความชื้นและยืดอายุการใช้งานของผ้าสกรีนวงจร พบว่าการเคลือบสูตร PDMS2 ลงบนผ้าสามารถกันน้ำดี น้ำไม่ซึมลงบนผ้า เมื่อนำผ้าที่ผ่านการเคลือบแล้วนำไปซัก พบว่า เคลือบสูตร PDMS2 ยังคงสภาพความต้านทานน้ำได้ดีที่สุด อีกทั้ง เมื่อนำสูตรเคลือบกันน้ำไปทำการเคลือบที่บนเส้นวงจรหมึกนำไฟฟ้า พบว่าไม่มีการหลุดร่อนของหมึกและมีสมบัติกันน้ำ แต่ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าวงจรที่ไม่ได้ทำการเคลือบ เนื่องจากสารที่ใช้ในการเคลือบ ไปเคลือบหมึกนำไฟฟ้าจึงทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น

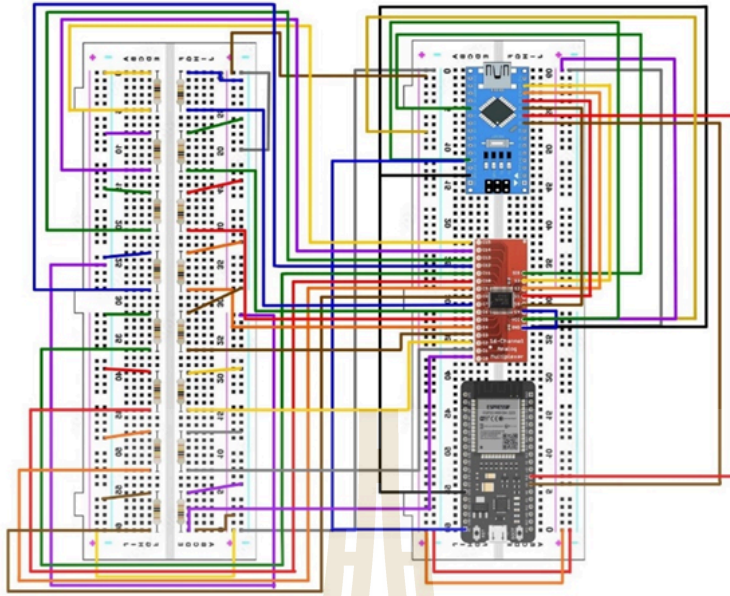
4.2 อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ ด้วยหมึกนำไฟฟ้าบนผ้า

ในการทดสอบหมึกนำไฟฟ้าด้วยแรงกดจากตุ้มน้ำหนัก และเครื่อง Universal Testing Machine พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเมื่อใช้แรงกดจากตุ้มน้ำหนักขนาด 100-1000 กรัม แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักไปค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่แม้วางน้ำหนักเพิ่มขึ้น การทดลองด้วยเครื่อง Universal Testing Machine แสดงผลลัพธ์เดียวกัน คือค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเมื่อมีแรงกดจากเครื่อง Universal Testing Machine และคงที่เมื่อเพิ่มแรงกด การทดลองนี้ใช้

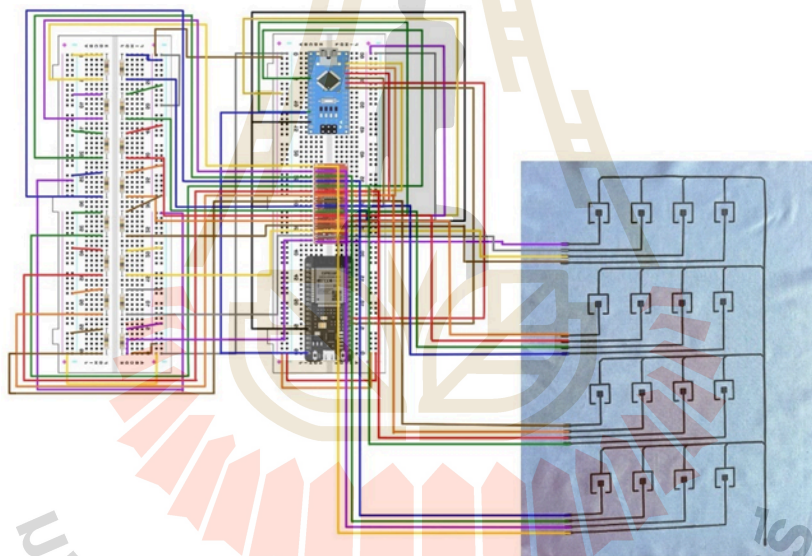
หมึกนำไฟฟ้าต้นทุนต่ำเพื่อวัดแรงกดทับ และแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีแรงกดทับ, ค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงและคงที่, สามารถแสดงสถานะ on-off ของเซ็นเซอร์ได้ เป็นวิธีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ เช่น ในการตรวจจับการตกเตียงหรือการลุกขึ้นของผู้ป่วย ที่มีการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีแรงกดทับเกิดขึ้น และไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้านั้นหมายความว่าผู้ป่วยไม่ได้อยู่บนเตียง



1. วงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ Data Acquisition ของอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับด้วยหมึกนำไฟฟ้าต้นทุนต่ำ



รูปที่ ก.1 การต่อวงจรวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ Data Acquisition



รูปที่ ก.2 การต่อวงจร Data Acquisition กับอาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดที่บนหน้า

2. Code สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ Data Acquisition

```
#include <WiFi.h>
```

```
#define RXD2 16
```

```

#define TXD2 17

String inputString = "";

bool stringComplete = false;

#define WIFI_STA_NAME "testAP"

#define WIFI_STA_PASS "123456789"

WiFiServer server(1992);

String dataSTR[16] = {"", "", "", "", "", "", "", "", "", "", "", "", "", "", ""};

int dataInt[16] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};

String data_send = "";

unsigned long previousMillis = 0;

void setup() {

    // Note the format for setting a serial port is as follows: Serial2.begin(baud-rate, protocol,
    RX pin, TX pin);

    Serial.begin(9600);

    //Serial1.begin(9600, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);

    Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);

    Serial.println("Serial Txd is on pin: " + String(TX));

    Serial.println("Serial Rxd is on pin: " + String(RX));

    Serial.print("Setting AP (Access Point)...");

    // Remove the password parameter, if you want the AP (Access Point) to be open

    WiFi.softAP(WIFI_STA_NAME, WIFI_STA_PASS);

    IPAddress IP = WiFi.softAPIP();

```

```
Serial.print("AP IP address: ");

Serial.println(IP);

server.begin();

previousMillis = millis();
}

void loop() {

WiFiClient client = server.available();

if (client) {

Serial.println("new client");

while (client.connected()) {

/*

data_send = "";

for (int i = 0; i < 16; i++) {

data_send = data_send + String(dataInt[i]) + ",";

}

client.println(data_send);

delay(500);*/

unsigned long currentMillis = millis();

if (currentMillis - previousMillis >= 1000) {
```

```

previousMillis = currentMillis;

data_send = "";

for (int i = 0; i < 16; i++) {

data_send = data_send + String(dataIn[i]) + ",";

}

client.println(data_send);

}

Read();

}

client.stop();

Serial.println("client disconnected");

}

Read();

}

void Read() {

while (Serial2.available()) {

char inChar = (char)Serial2.read();

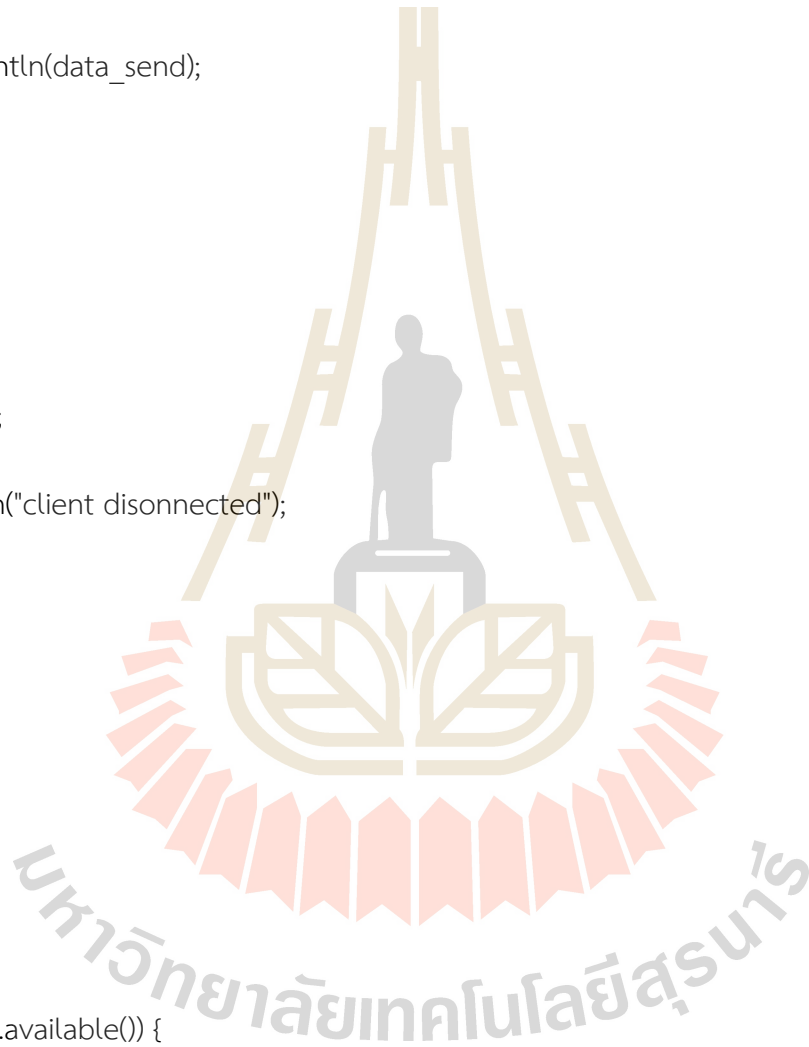
if (inChar == '\n') {

stringComplete = true;

}

}

```



```

else {

inputString += inChar;

}

}

if (stringComplete) {

Serial.println("Length = " + String(inputString.length()));

Serial.println("Data = " + inputString);

if (inputString.length() == 97) {

for (int a = 0; a < 16; a++) {

dataInt[a] = inputString.substring((a * 5) + a, (a * 5) + (5 + a)).toInt();

//dataInt[]

Serial.println("Value" + String(a) + " = " + String(dataInt[a]));

}

//String value1_STR = inputString.substring(0, 5);

}

//Serial.println("Value1 = " + value1_STR);

inputString = "";

stringComplete = false;

Serial.println("-----");

}

```

```
}
```

3. Code สำหรับ Arduino Nano

```
#include <SoftwareSerial.h>
```

```
SoftwareSerial mySerial(6, 7);
```

```
//Mux control pins
```

```
int s0 = 8;
```

```
int s1 = 9;
```

```
int s2 = 10;
```

```
int s3 = 11;
```

```
//Mux in "SIG" pin
```

```
int SIG_pin = A1;
```

```
void setup() {
```

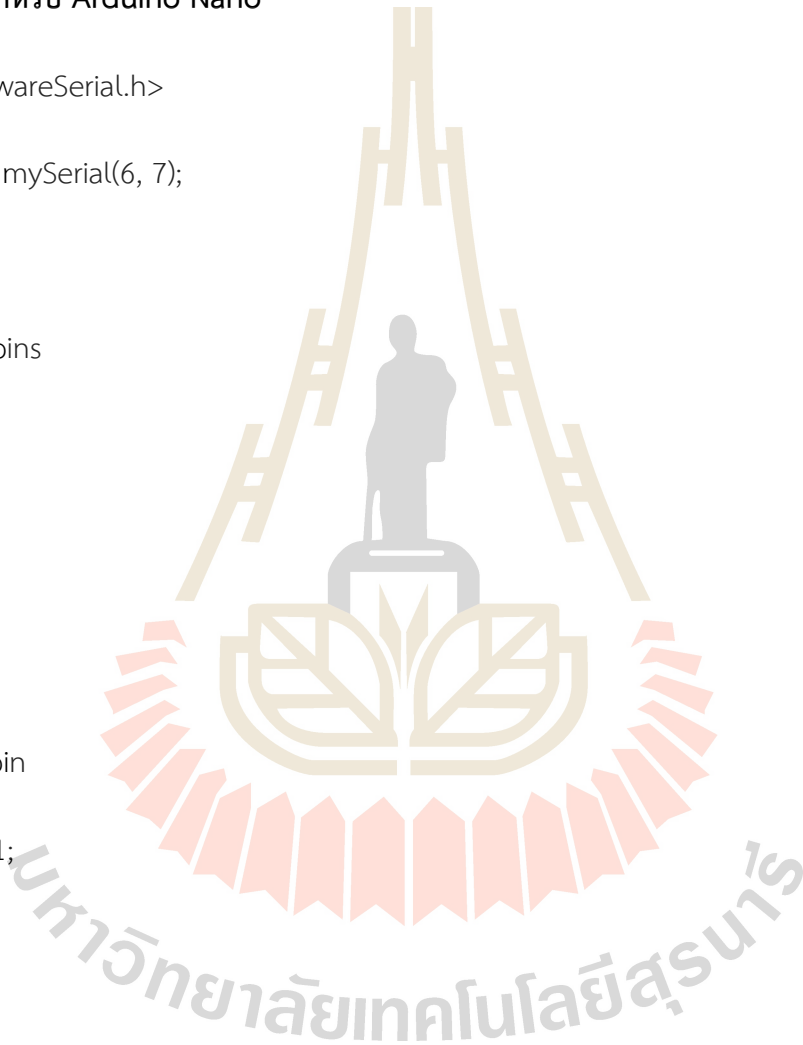
```
  pinMode(s0, OUTPUT);
```

```
  pinMode(s1, OUTPUT);
```

```
  pinMode(s2, OUTPUT);
```

```
  pinMode(s3, OUTPUT);
```

```
  digitalWrite(s0, LOW);
```




```
digitalWrite(s1, LOW);  
digitalWrite(s2, LOW);  
digitalWrite(s3, LOW);
```

```
Serial.begin(9600);
```

```
mySerial.begin(9600);
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
  for (int i = 0; i < 16; i ++){
```

```
    int value_ = readMux(i);
```

```
    Serial.print(Convert(String(value_)));
```

```
    Serial.print(",");
```

```
    mySerial.print(Convert(String(value_)));
```

```
    mySerial.print(",");
```

```
    delay(1);
```

```
  }
```

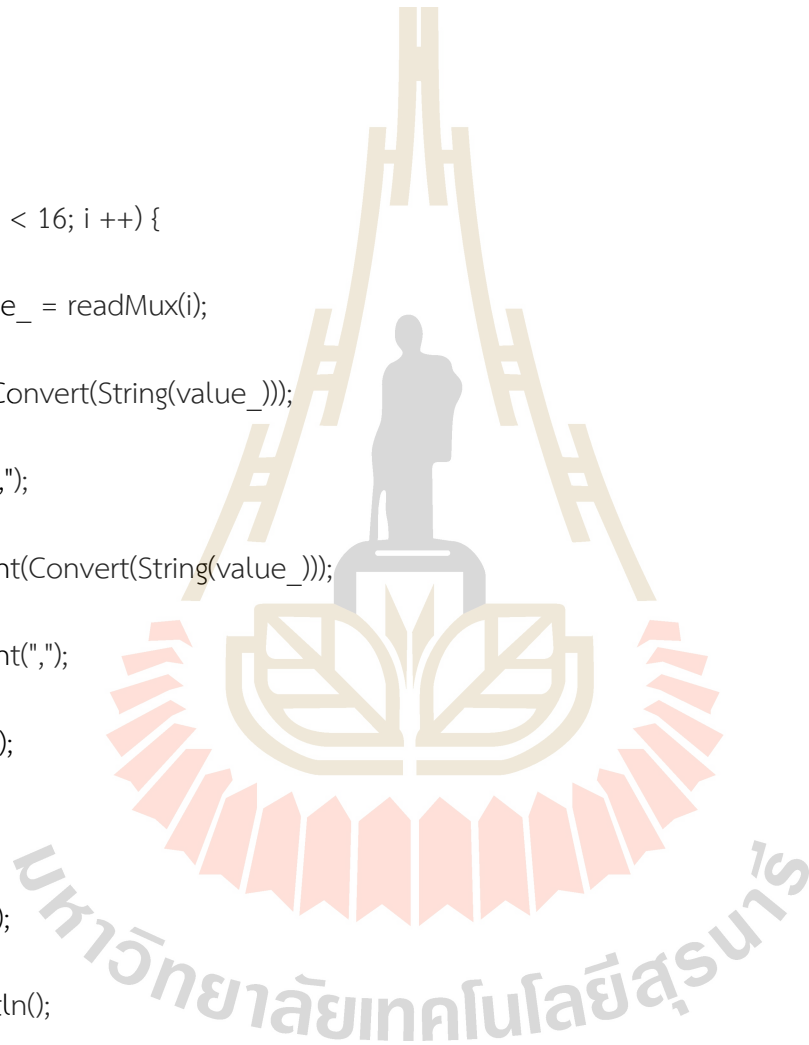
```
  Serial.println();
```

```
  mySerial.println();
```

```
  delay(500);
```

```
}
```

```
String Convert(String val){
```



```

if(val.length() == 5){

    return val;

}

else if(val.length() == 4){

    return "0" + val;

}

else if(val.length() == 3){

    return "00" + val;

}

else if(val.length() == 2){

    return "000" + val;

}

else if(val.length() == 1){

    return "0000" + val;

}

}

```

```

int readMux(int channel) {

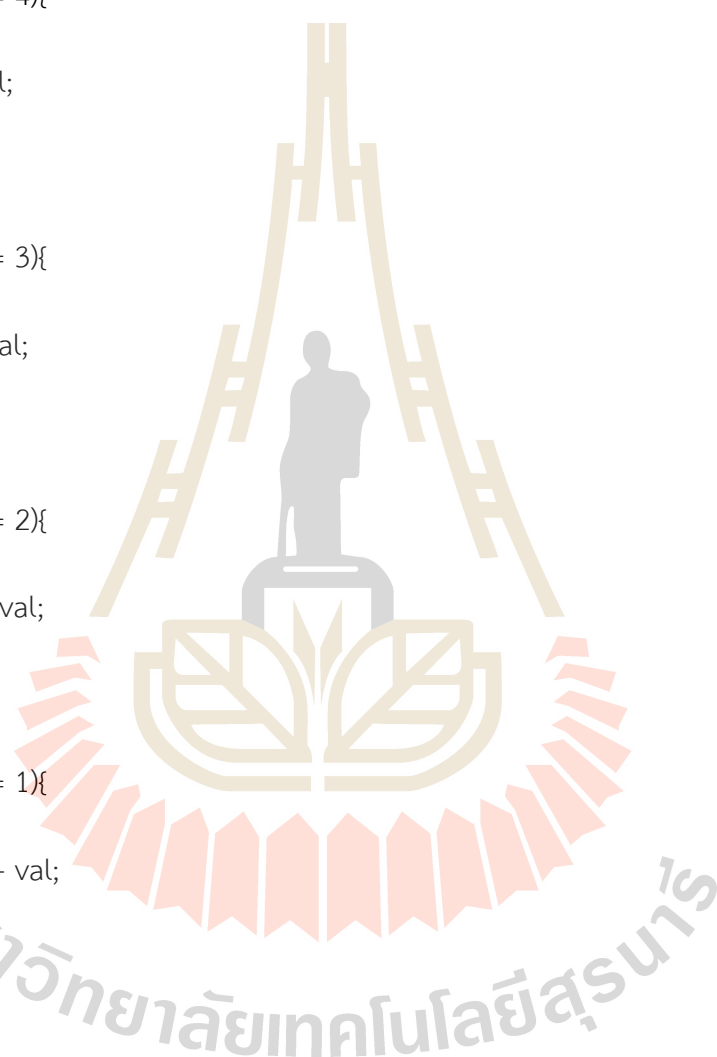
    int controlPin[] = {s0, s1, s2, s3};

    int muxChannel[16][4] = {

        {0, 0, 0, 0}, //channel 0

        {1, 0, 0, 0}, //channel 1

```



```

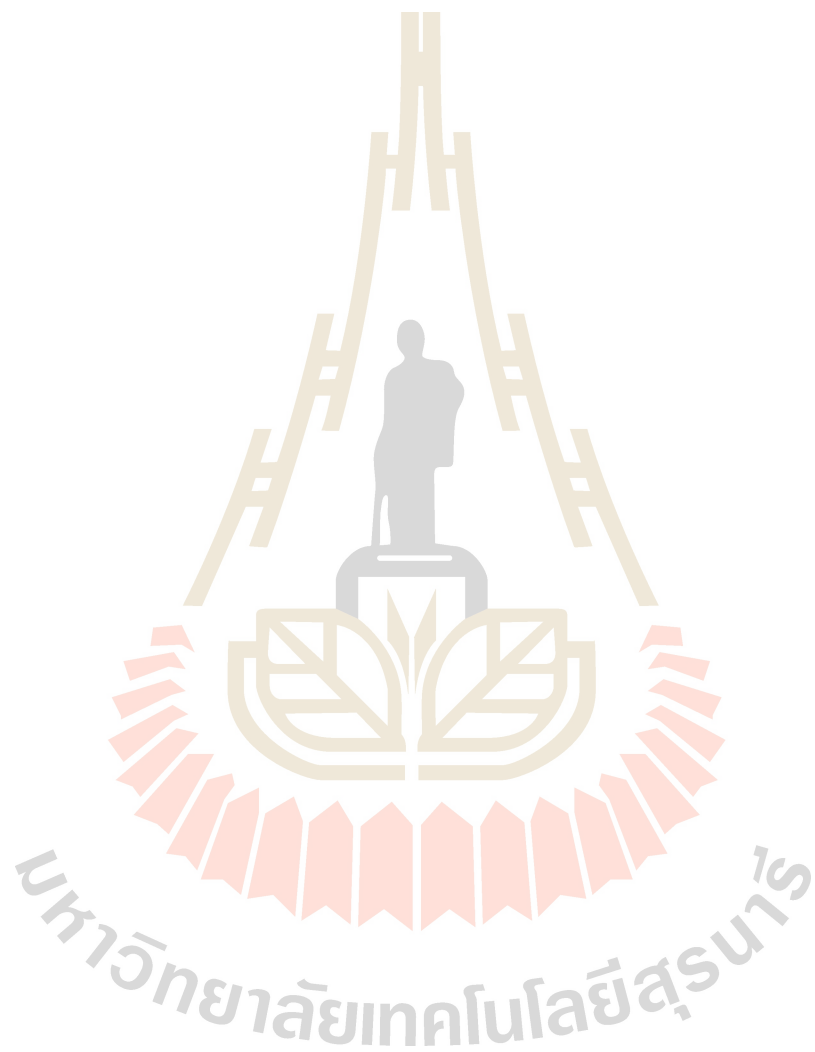
    {0, 1, 0, 0}, //channel 2
    {1, 1, 0, 0}, //channel 3
    {0, 0, 1, 0}, //channel 4
    {1, 0, 1, 0}, //channel 5
    {0, 1, 1, 0}, //channel 6
    {1, 1, 1, 0}, //channel 7
    {0, 0, 0, 1}, //channel 8
    {1, 0, 0, 1}, //channel 9
    {0, 1, 0, 1}, //channel 10
    {1, 1, 0, 1}, //channel 11
    {0, 0, 1, 1}, //channel 12
    {1, 0, 1, 1}, //channel 13
    {0, 1, 1, 1}, //channel 14
    {1, 1, 1, 1} //channel 15
};

//loop through the 4 sig
for (int i = 0; i < 4; i ++) {
    digitalWrite(controlPin[i], muxChannel[channel][i]);
}

//read the value at the SIG pin
int val = analogRead(SIG_pin);

//return the value
return val;
}

```



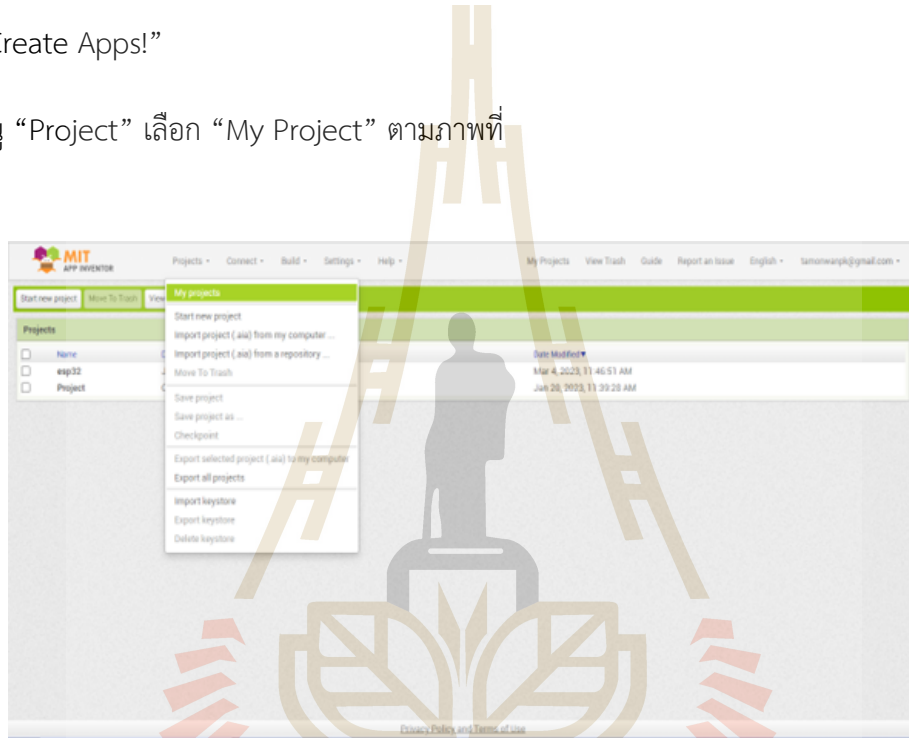
ภาคผนวก ข

วิธีการสร้างแอปพลิเคชัน MIT APP INVENTOR

เพื่อแสดงผล GUI อาร์เรย์เซ็นเซอร์วัดแรงกดทับ

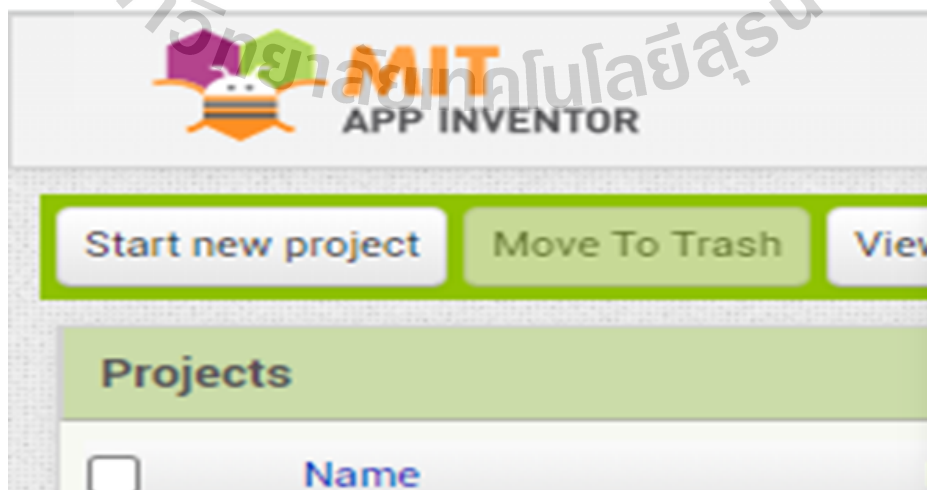
1. ขั้นตอนการสร้างแอปพลิเคชัน MIT APP INVENTOR

1. คลิกที่ “Create Apps!”
2. คลิกที่เมนู “Project” เลือก “My Project” ตามภาพที่



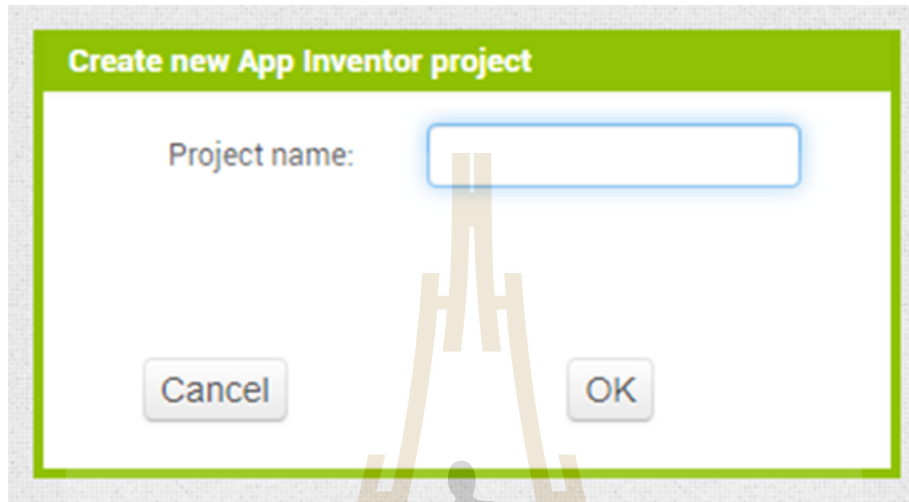
รูปที่ ข.1 เมนู My Project

3. คลิกที่ “Start new project”



รูปที่ ข.2 ปุ่ม “Start new project”

- ตั้งชื่อแอปพลิเคชันตามความต้องการ ตั้งเสร็จแล้วให้กดปุ่ม OK



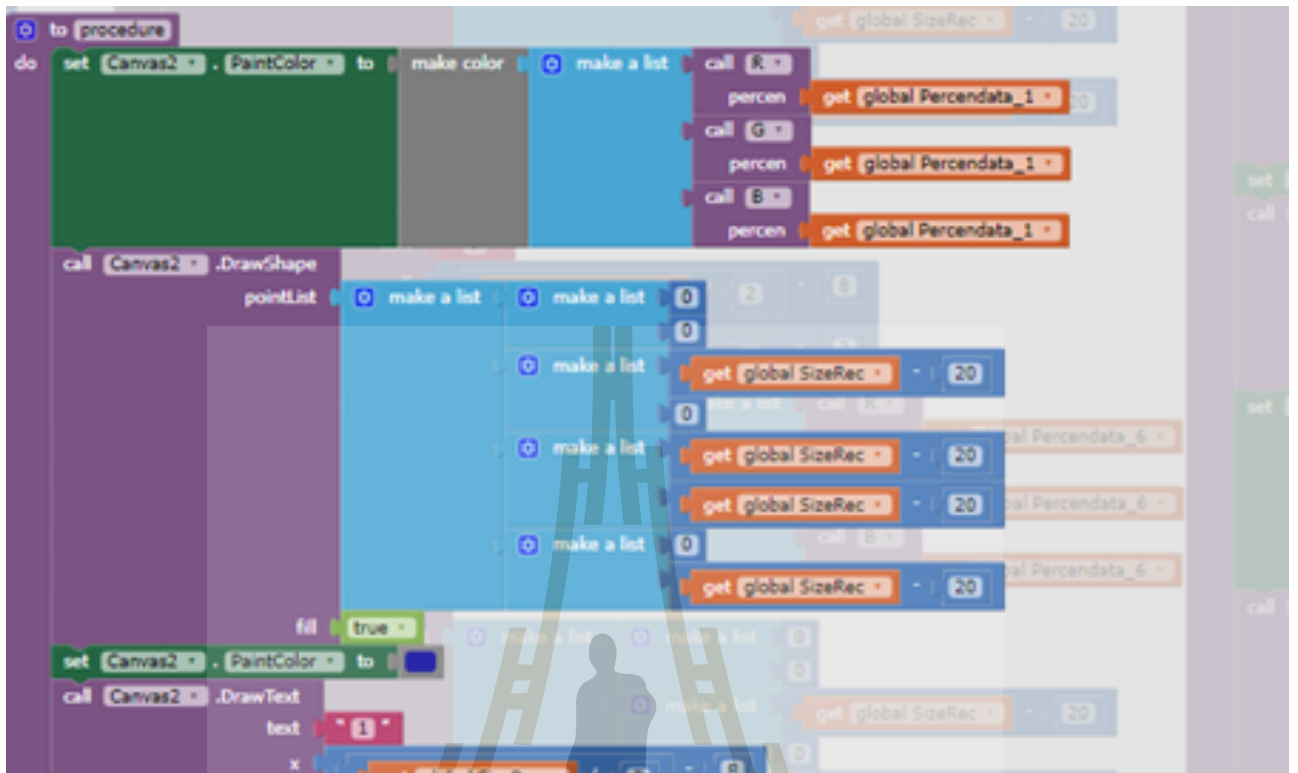
รูปที่ ข.3 หน้าต่างตั้งชื่อแอปพลิเคชัน

- บันทึกหน้าตาที่พร้อมทำแอปพลิเคชัน



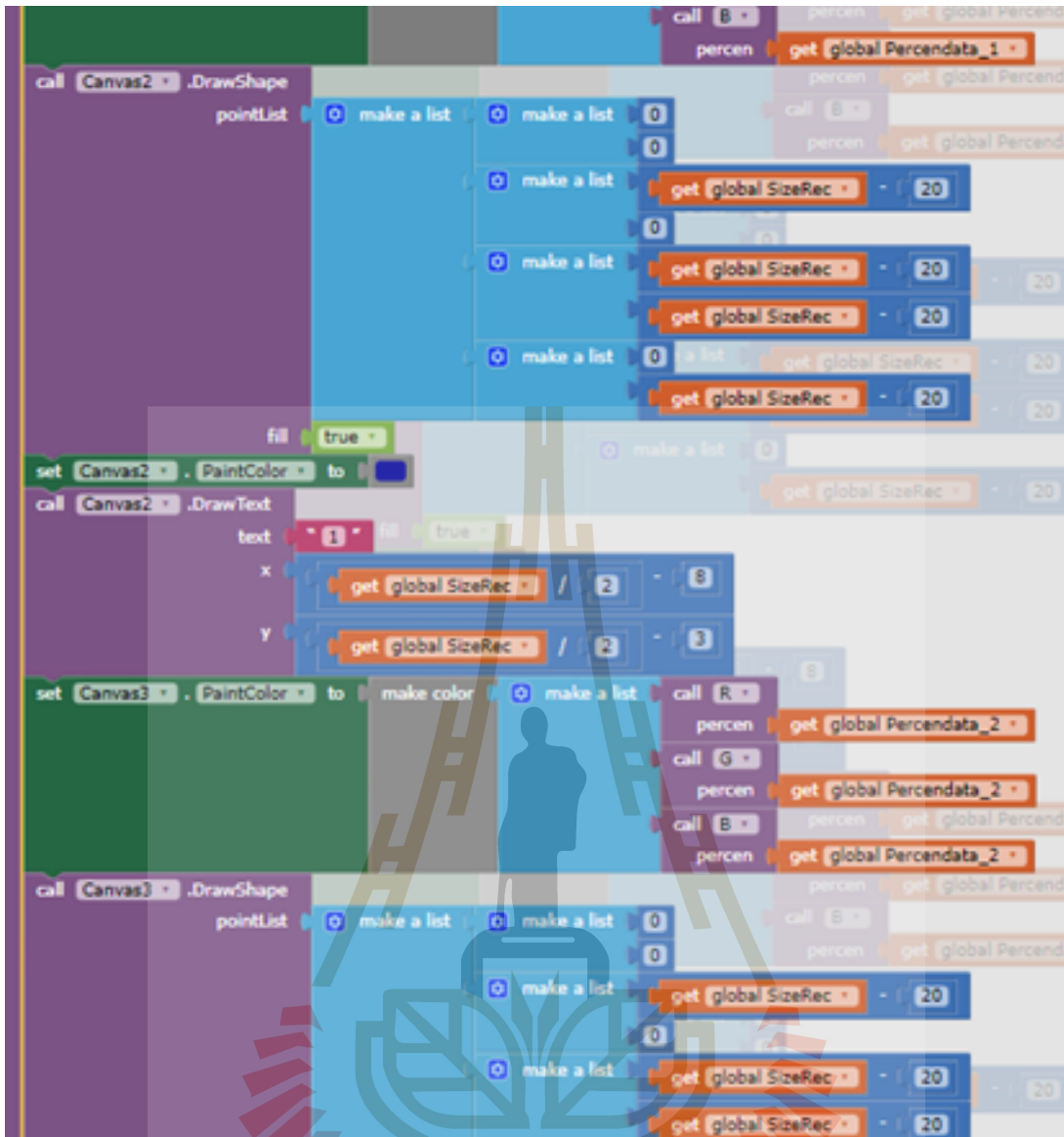
รูปที่ ข.4 หน้าต่างทำแอปพลิเคชัน

2. โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor



รูปที่ ข.5 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor





รูปที่ ข.6 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

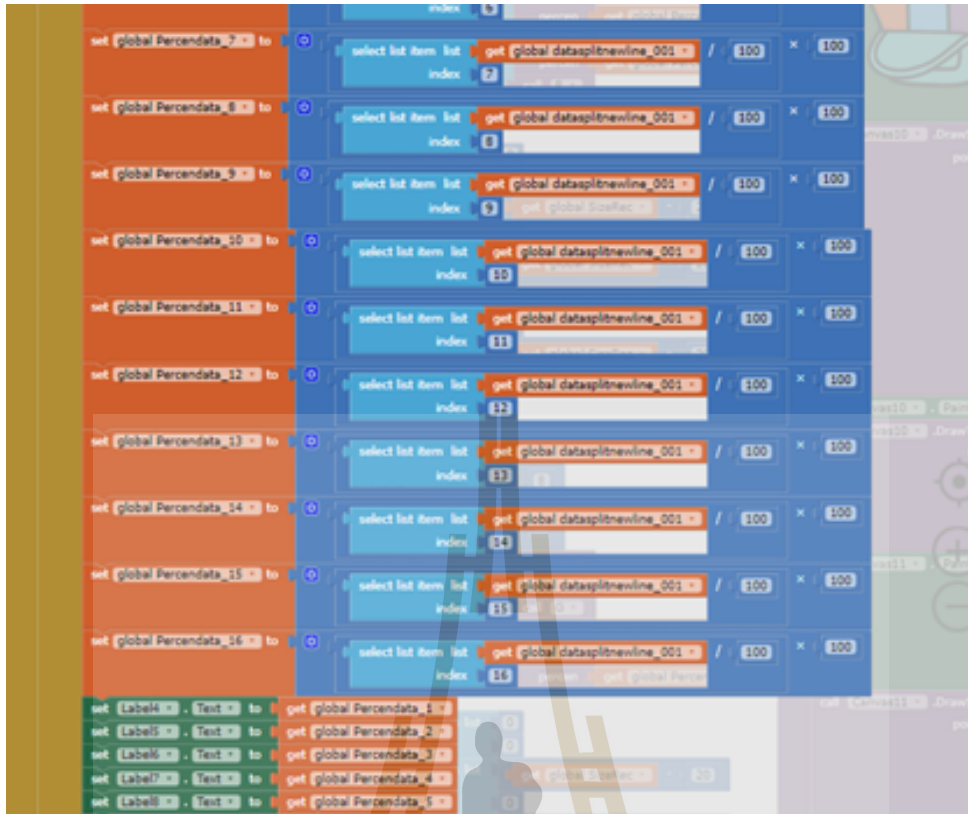
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

The image shows a screenshot of the MIT App Inventor code editor. The code is organized into several sections:

- Initialization:** Multiple 'initialize global' blocks for 'Percendata' (note the typo) are set to 0.
- Socket Data Reception:** A 'when ClientSocketAI2Ext1 .DataReceived' block triggers a 'do' loop.
- Data Splitting:** Inside the 'do' loop, 'global datasplitnewline' is set to 'split text' of 'data' at the character '\n'.
- Length Check:** An 'if' block checks if the length of 'data' is greater than 10.
- Text Assignment:** 'TextBoxReceived .Text' is set to 'data'.
- List Processing:** 'global datasplitnewline_001' is set to 'split text' of 'data' at the character '\n'. An 'if' block checks if the length of this list is 16.
- Percentage Calculation:** A 'then' block contains six 'set global Percendata' blocks (note the typo). Each block calculates a percentage based on a list item from 'global datasplitnewline_001' (indices 1 through 6) using the formula: $\frac{\text{select list item list get } \dots / 100 \times 100}{100}$.

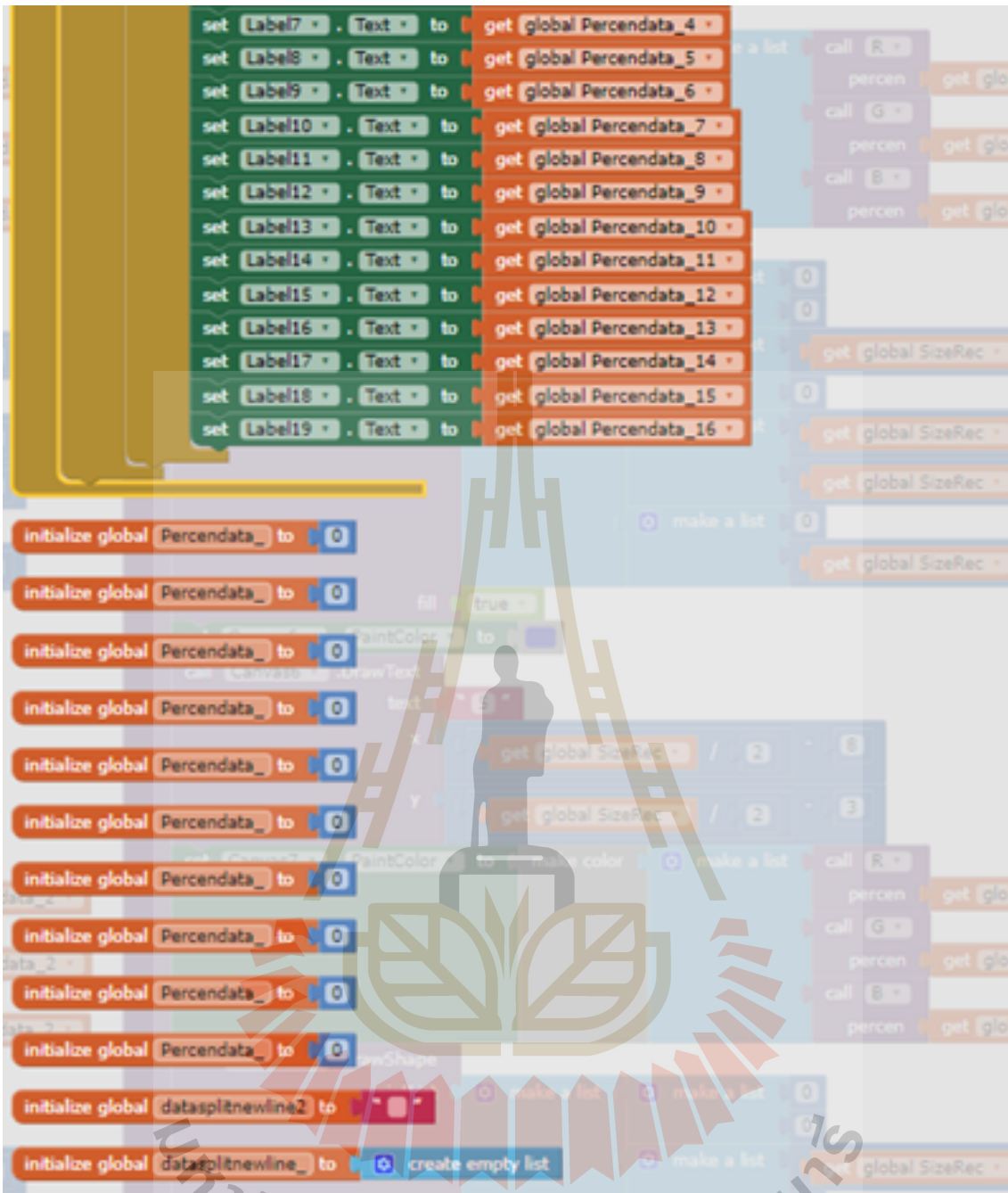
รูปที่ ข.7 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.8 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ๗.9 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

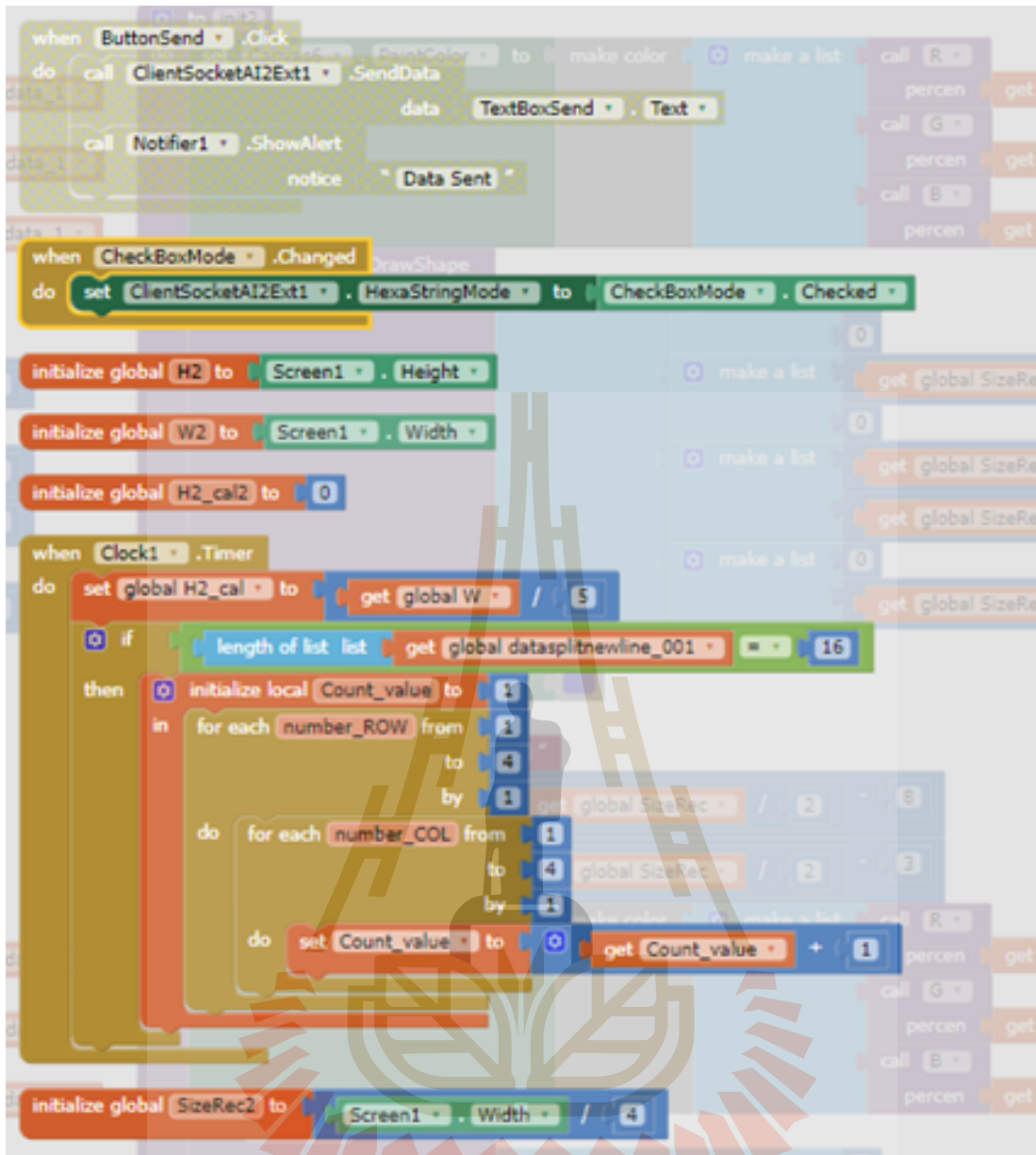
```
initialize global datasplitnewline2 to ""
initialize global datasplitnewline_ to create empty list

when ButtonConnect.Click
do
  set ClientSocketAI2Ext1.ServerAddress to TextBoxAddress.Text
  set ClientSocketAI2Ext1.ServerPort to TextBoxPort.Text
  call ClientSocketAI2Ext1.Connect
  if ClientSocketAI2Ext1.ConnectionState = true
  then
    set CheckBoxConnected.Checked to true
    call Notifier1.ShowAlert notice "Connected !"
  else
    call Notifier1.ShowAlert notice "Not Connected !"

when ClientSocketAI2Ext1.RemoteConnectionClosed
do
  set CheckBoxConnected.Checked to false
```

รูปที่ ข.10 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.11 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

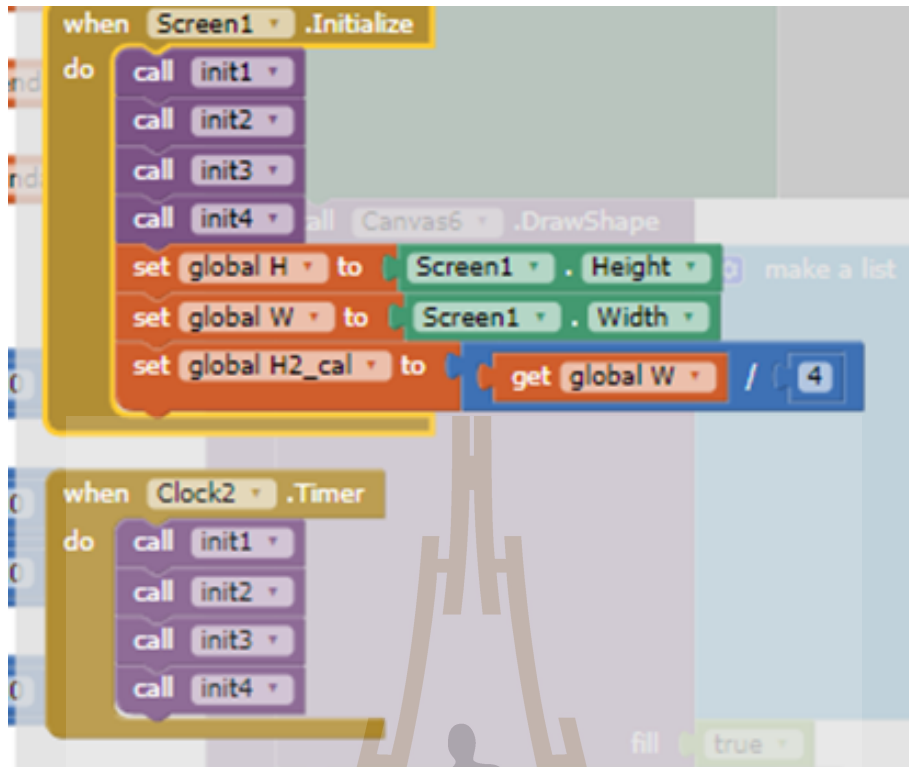
when CheckBoxMode .Changed
do
  set ClientSocketAI2Ext1 . HexaStringMode to CheckBoxMode . Checked
  initialize global H2 to Screen1 . Height
  initialize global W2 to Screen1 . Width
  initialize global H2_cal2 to 0

when Clock1 .Timer
do
  set global H2_cal to get global W / 5
  if length of list list = get global datasplitnewline_001 = 16
  then
    initialize local Count_value to 1
    in for each number_ROW from 1 to 4 by 1
    do
      for each number_COL from 1 to 4 by 1
      do
        set Count_value to get Count_value + 1
    initialize global SizeRec2 to Screen1 . Width / 4

when Screen1 .Initialize
do
  call init1
  call init2
  call init3
  call init4
  set global H to Screen1 . Height
  set global W to Screen1 . Width
  set global H2_cal to get global W / 4

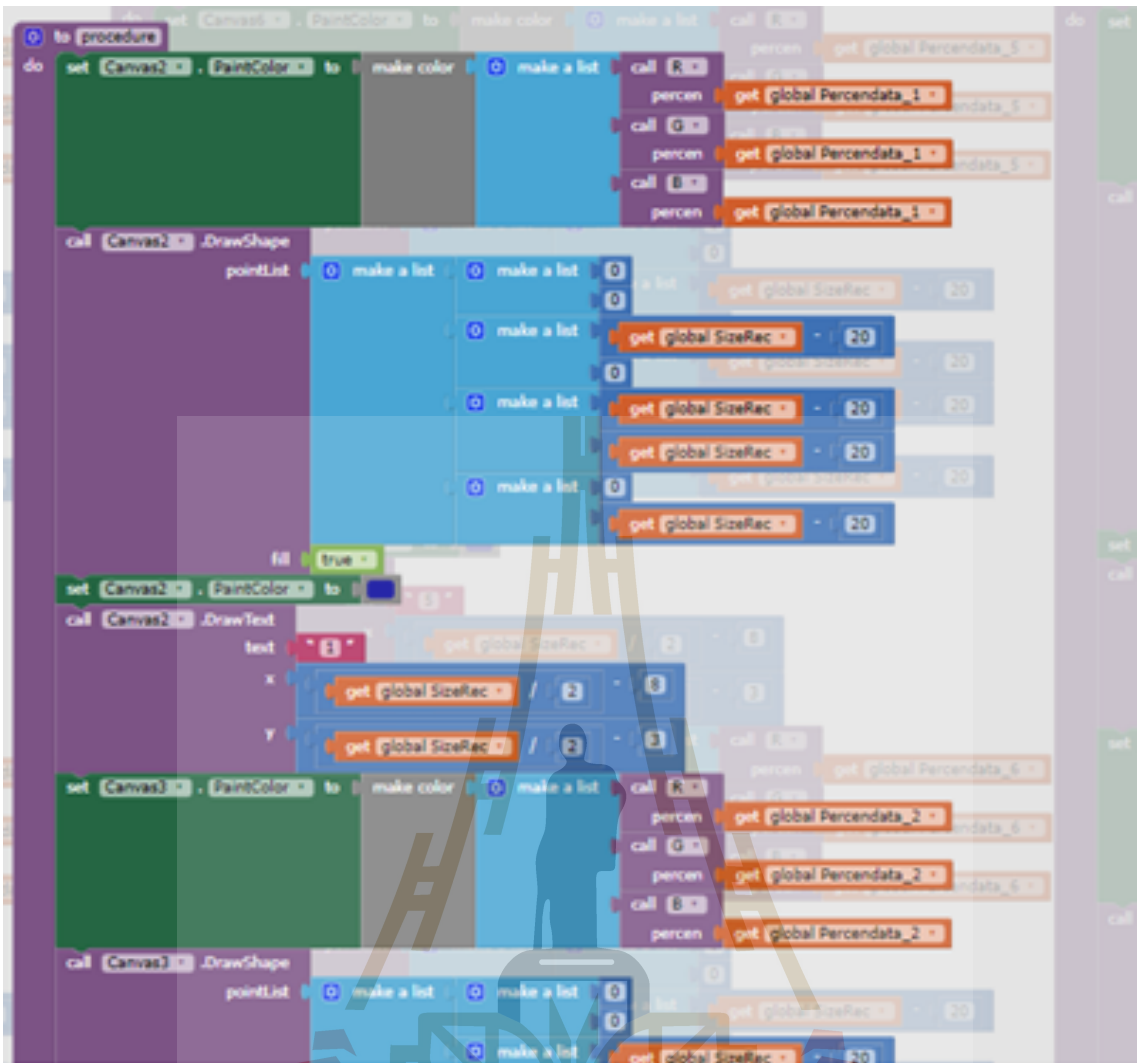
```

รูปที่ ข.12 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor



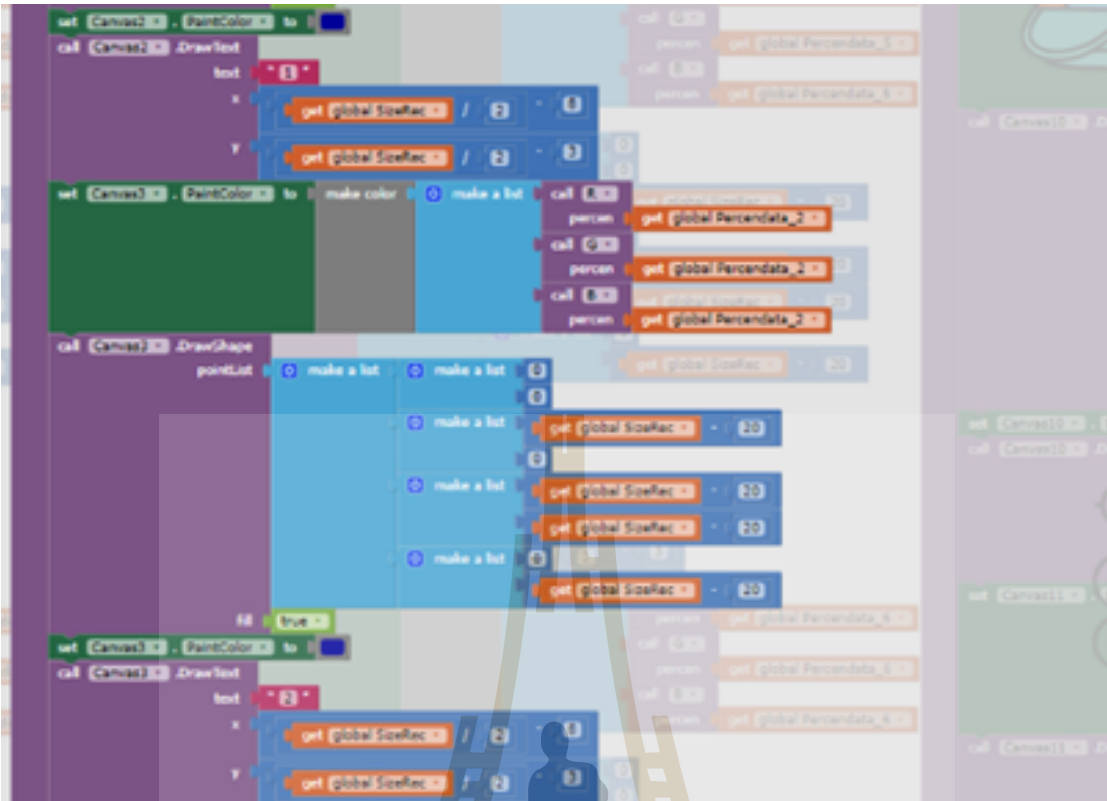
รูปที่ ข.13 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



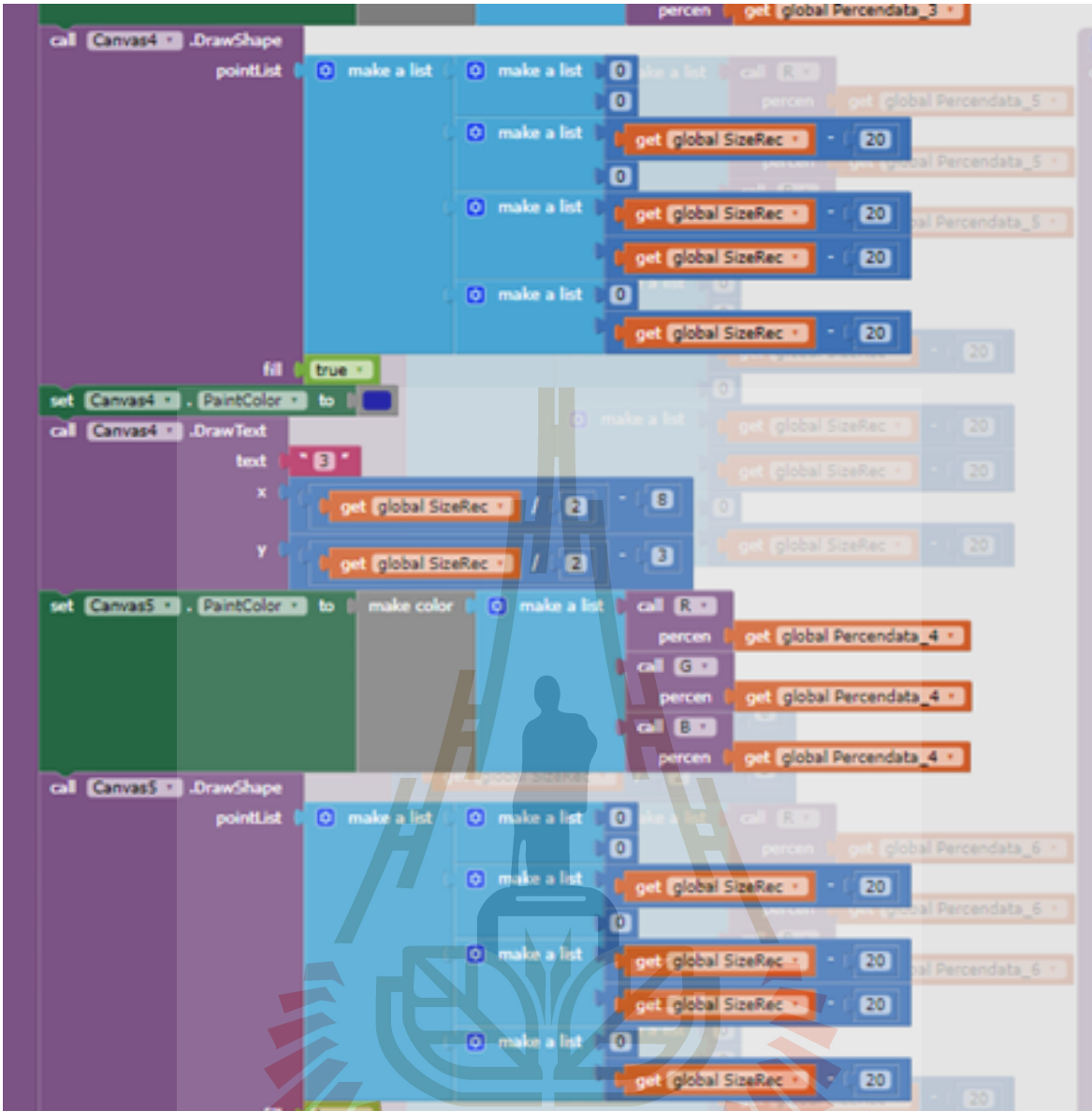
รูปที่ ข.14 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



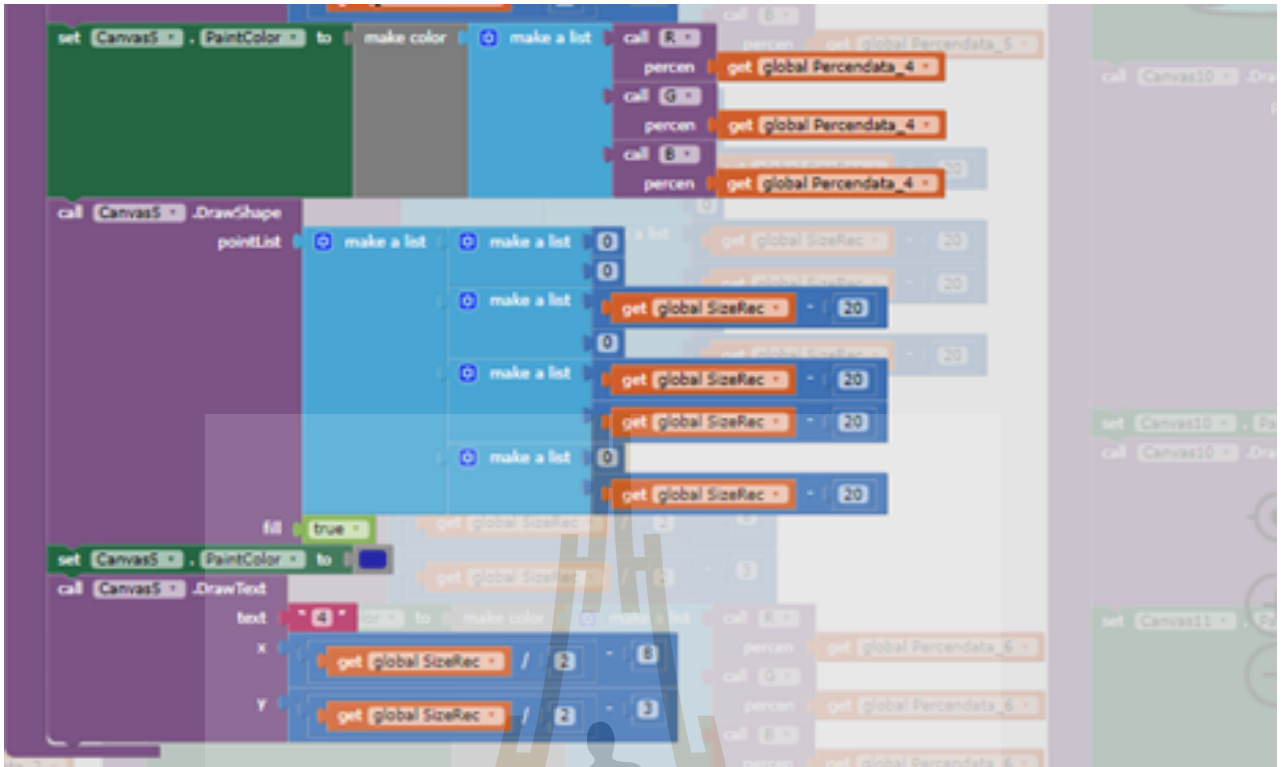
รูปที่ ข.15 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor



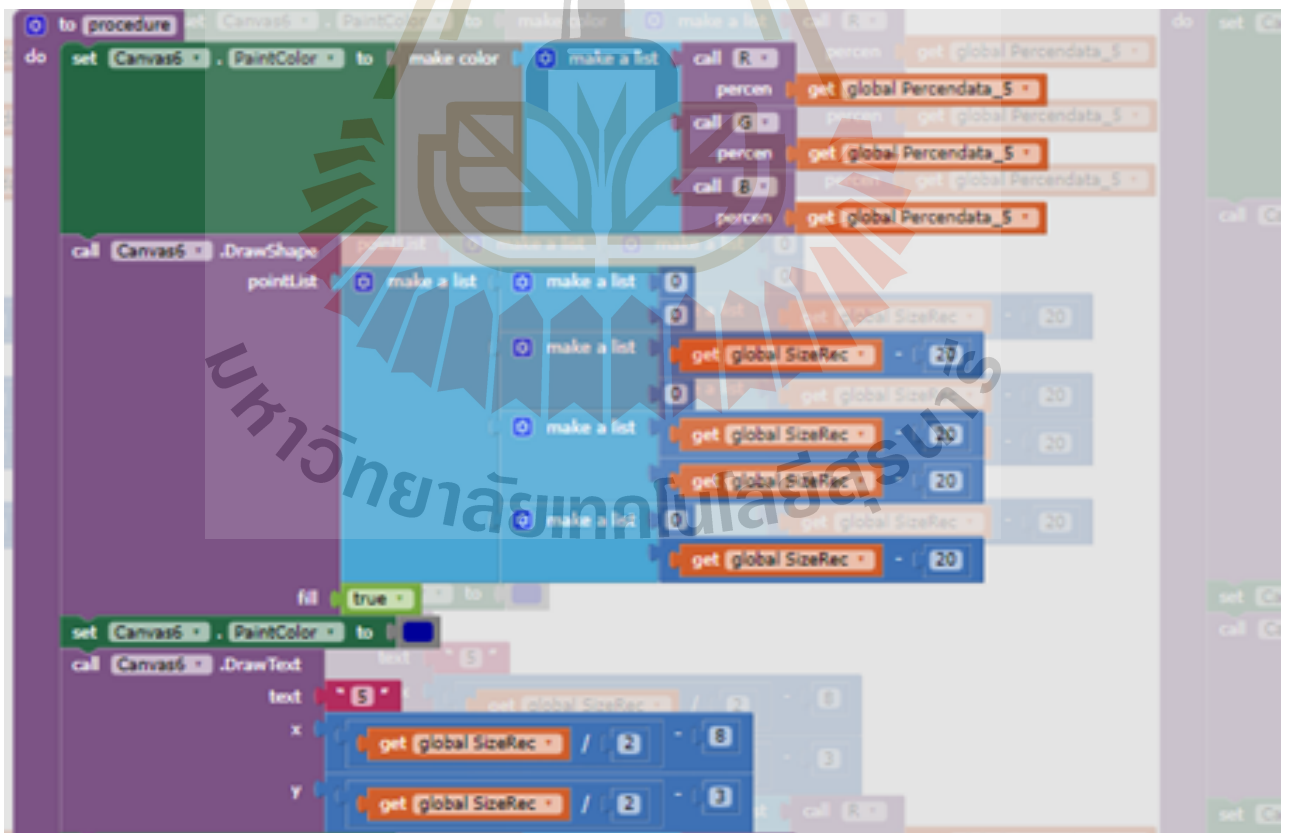


รูปที่ ข.16 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

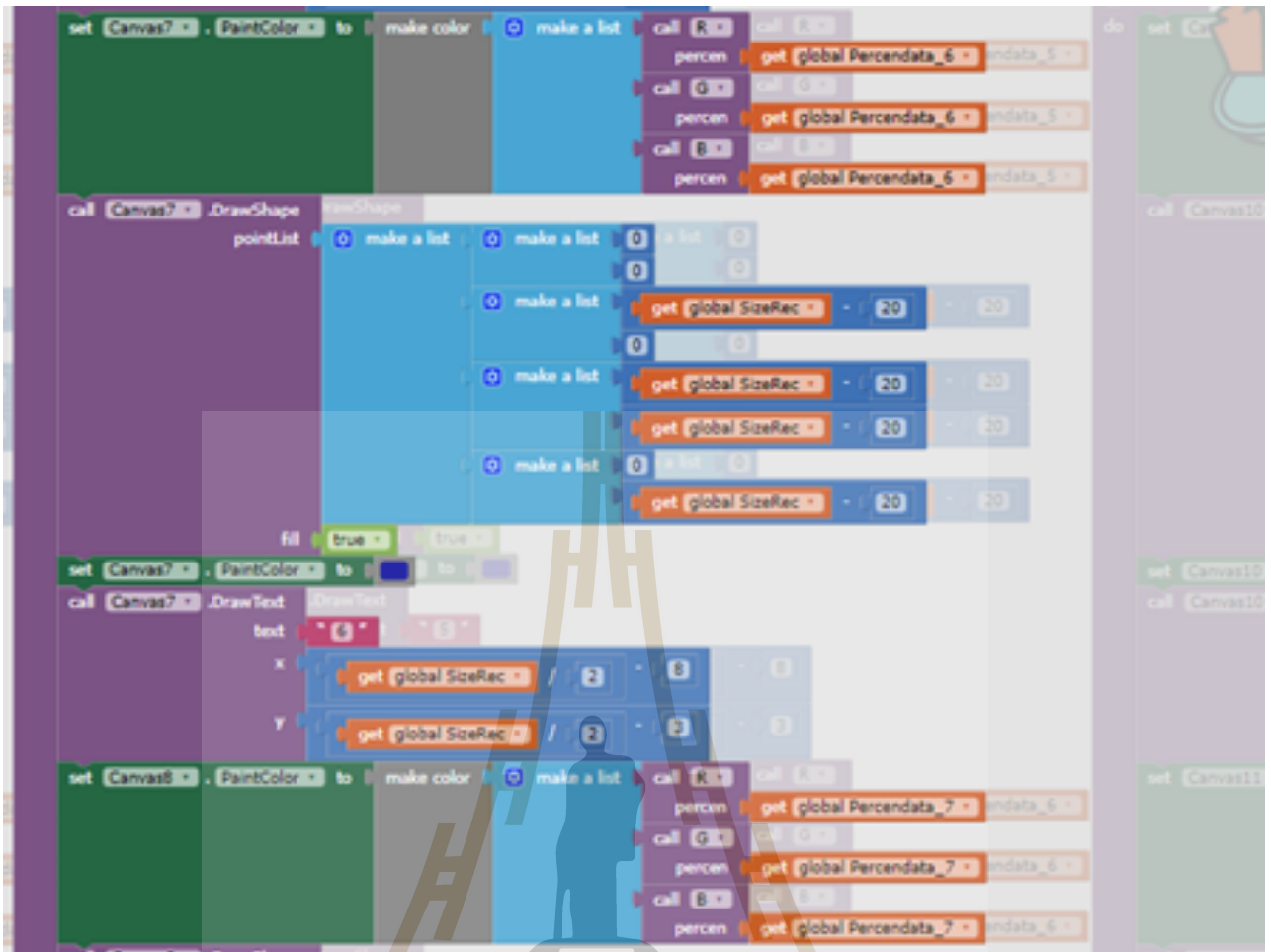
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.17 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

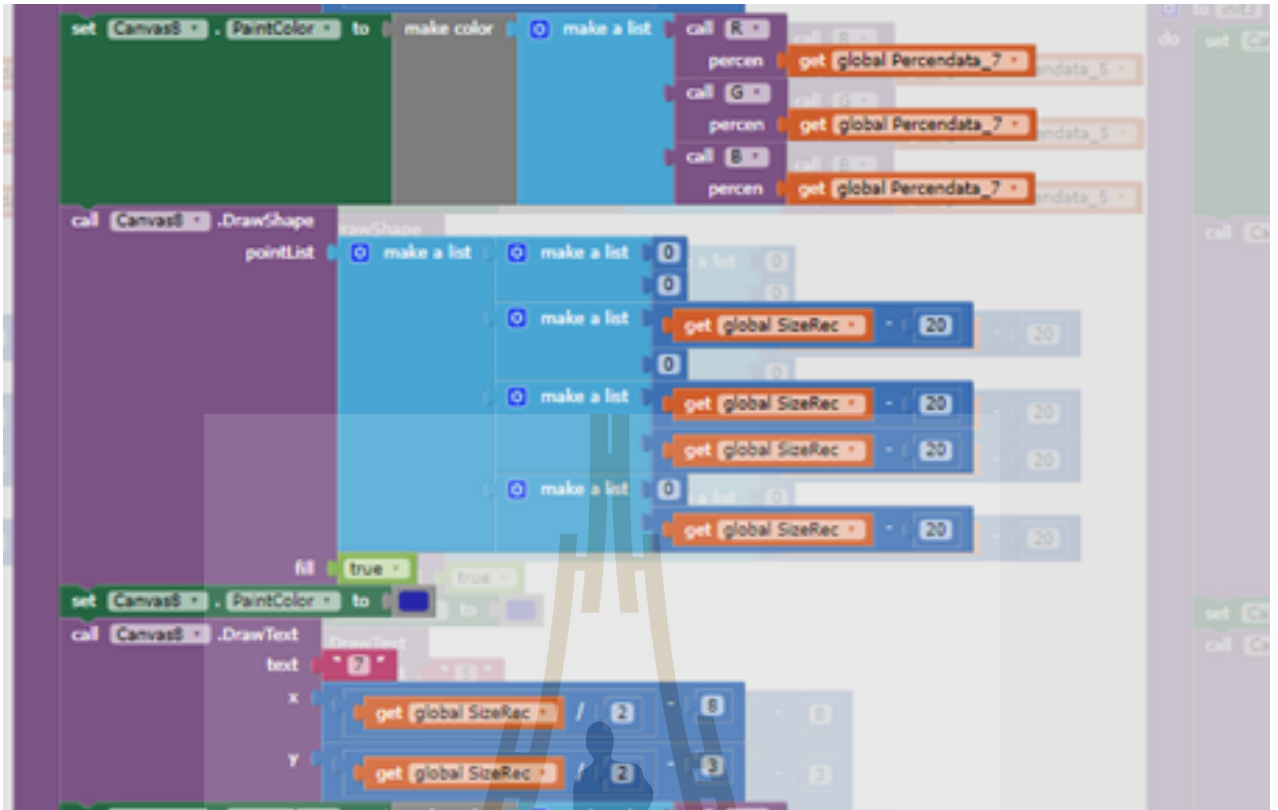


รูปที่ ข.18 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor



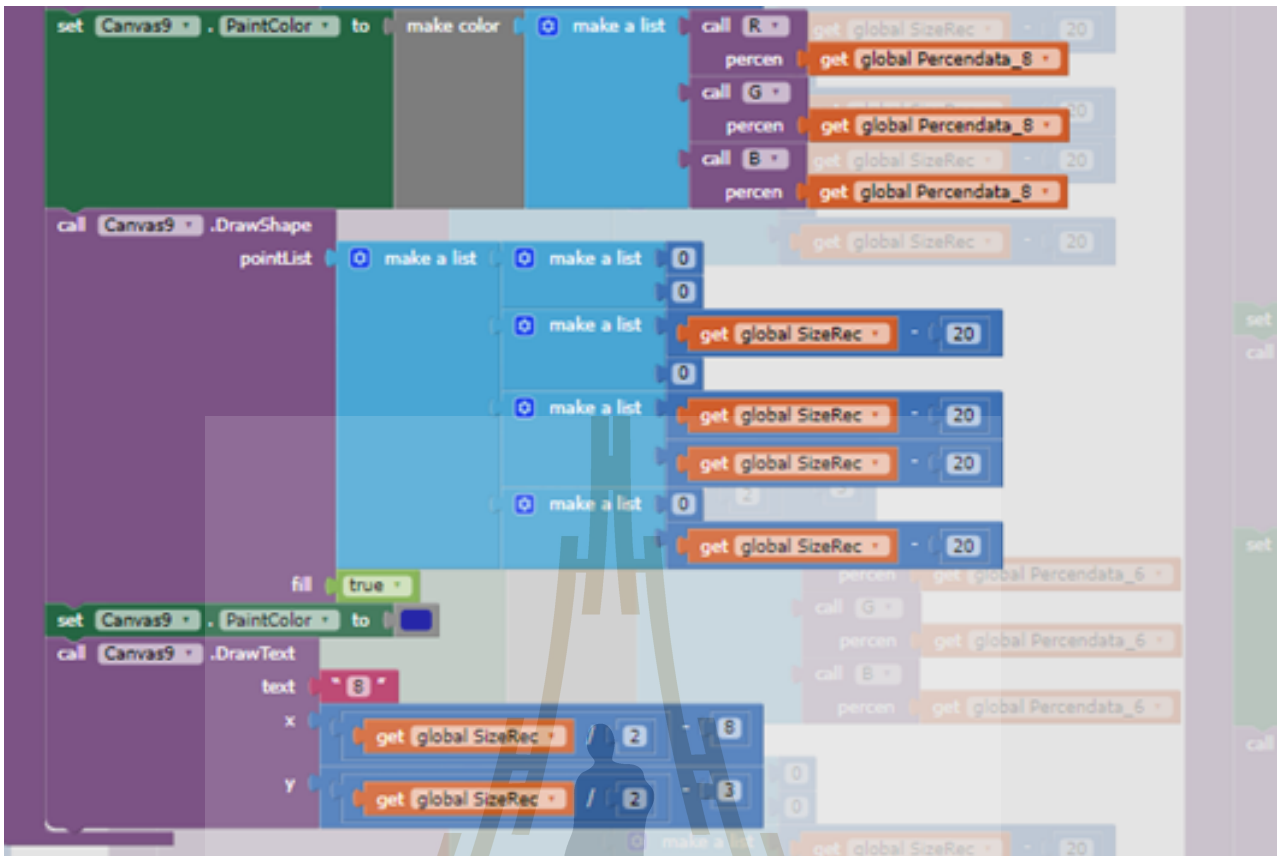
รูปที่ ข.19 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor





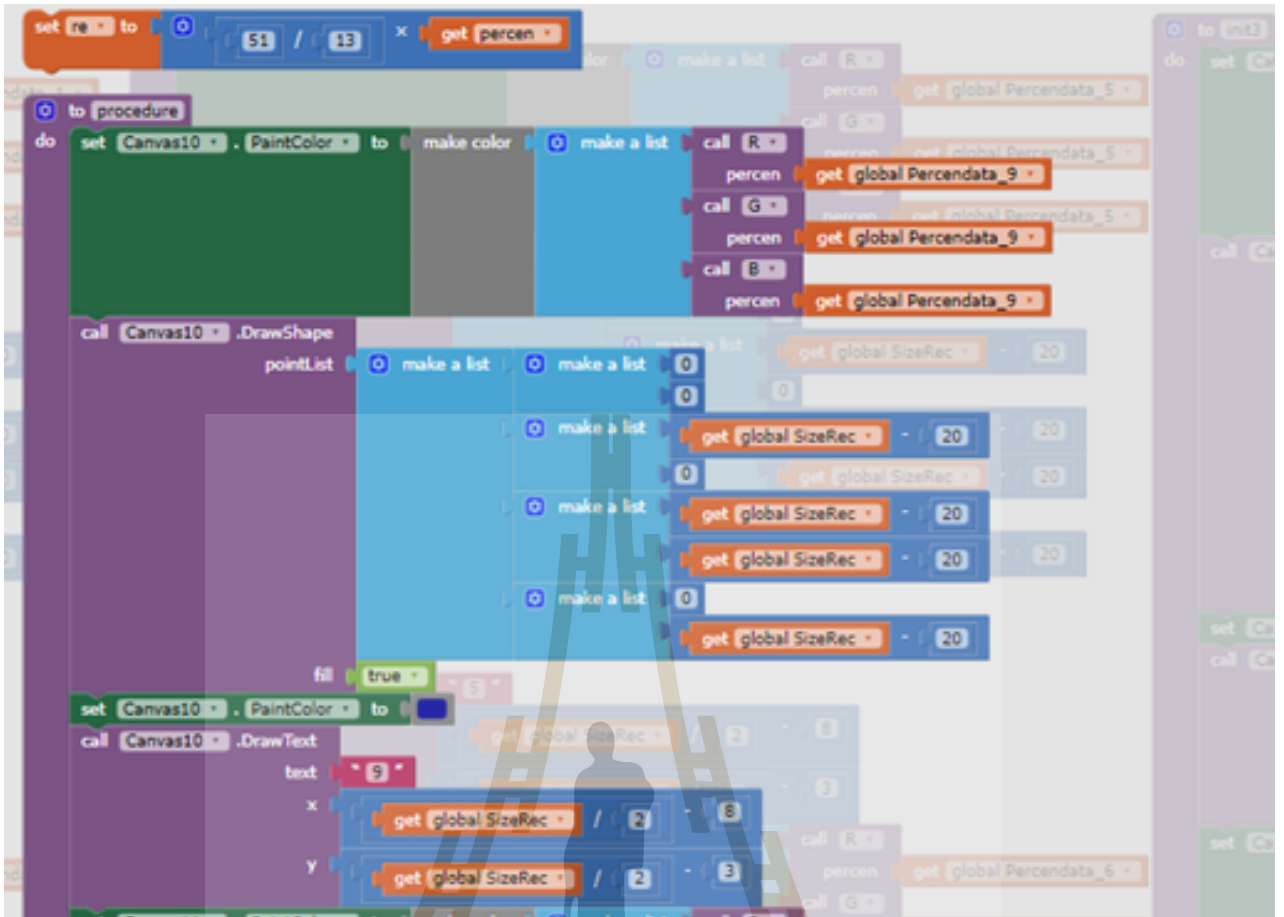
รูปที่ ข.20 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor





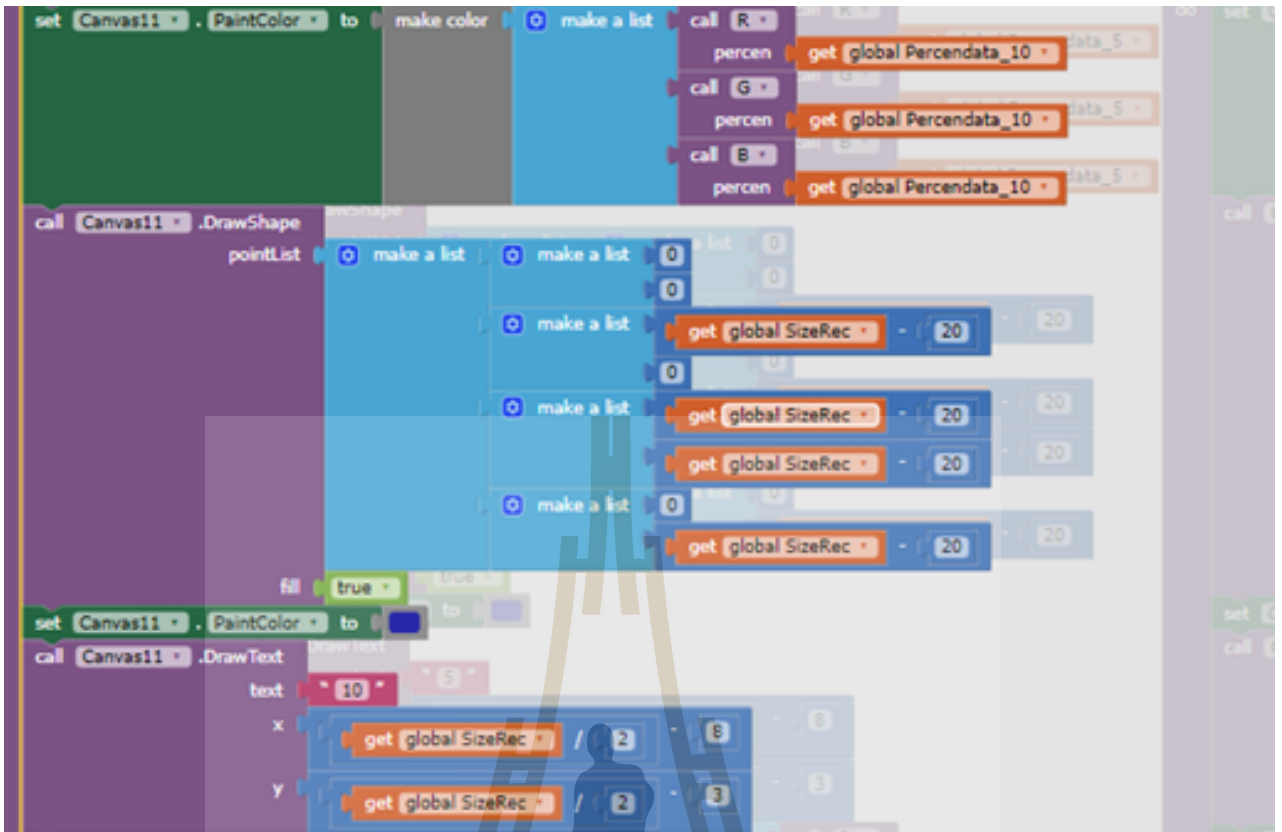
รูปที่ ข.21 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor



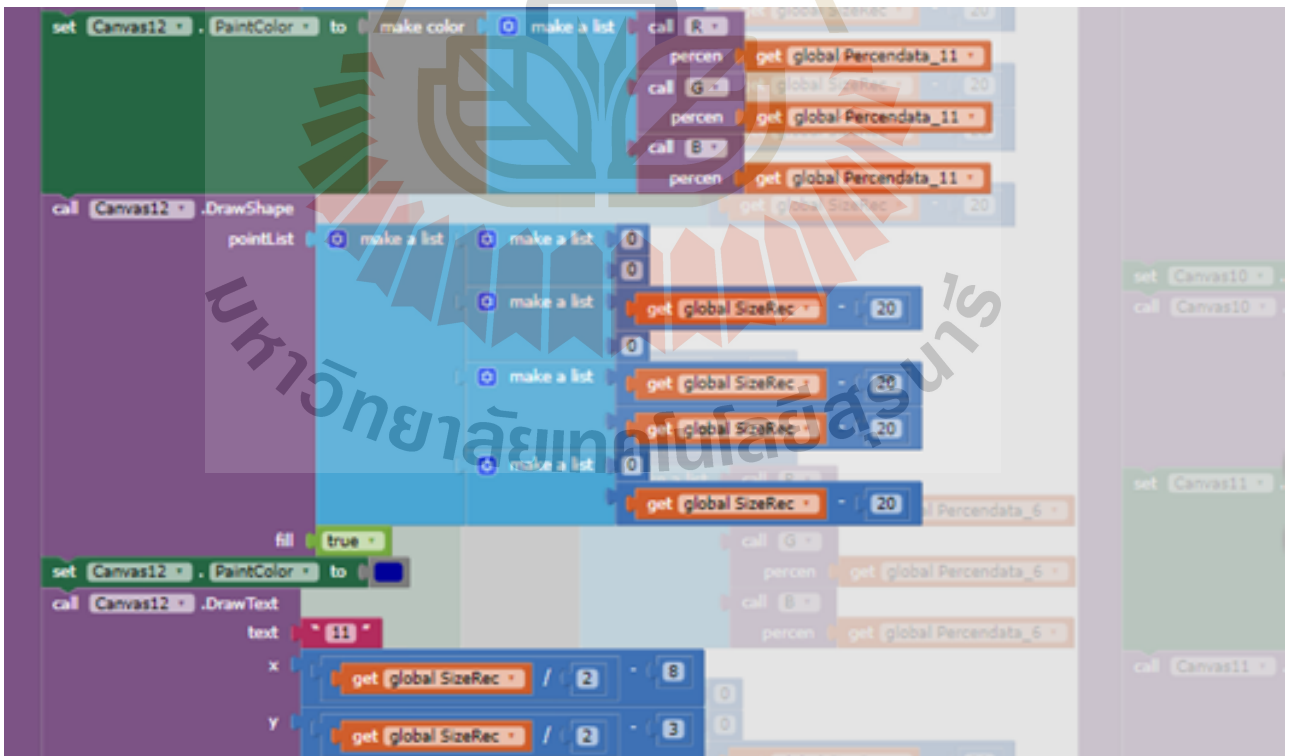


รูปที่ ข.22 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

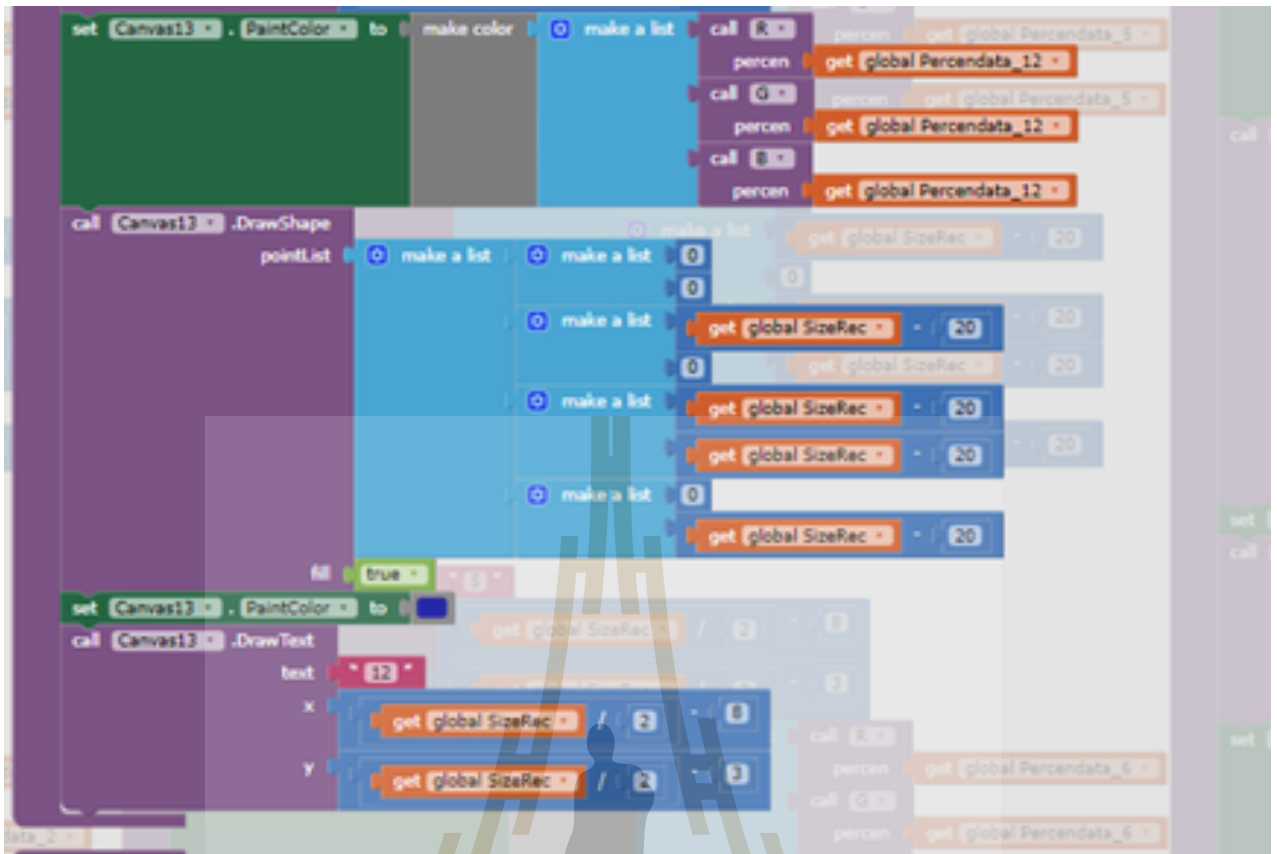
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.23 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

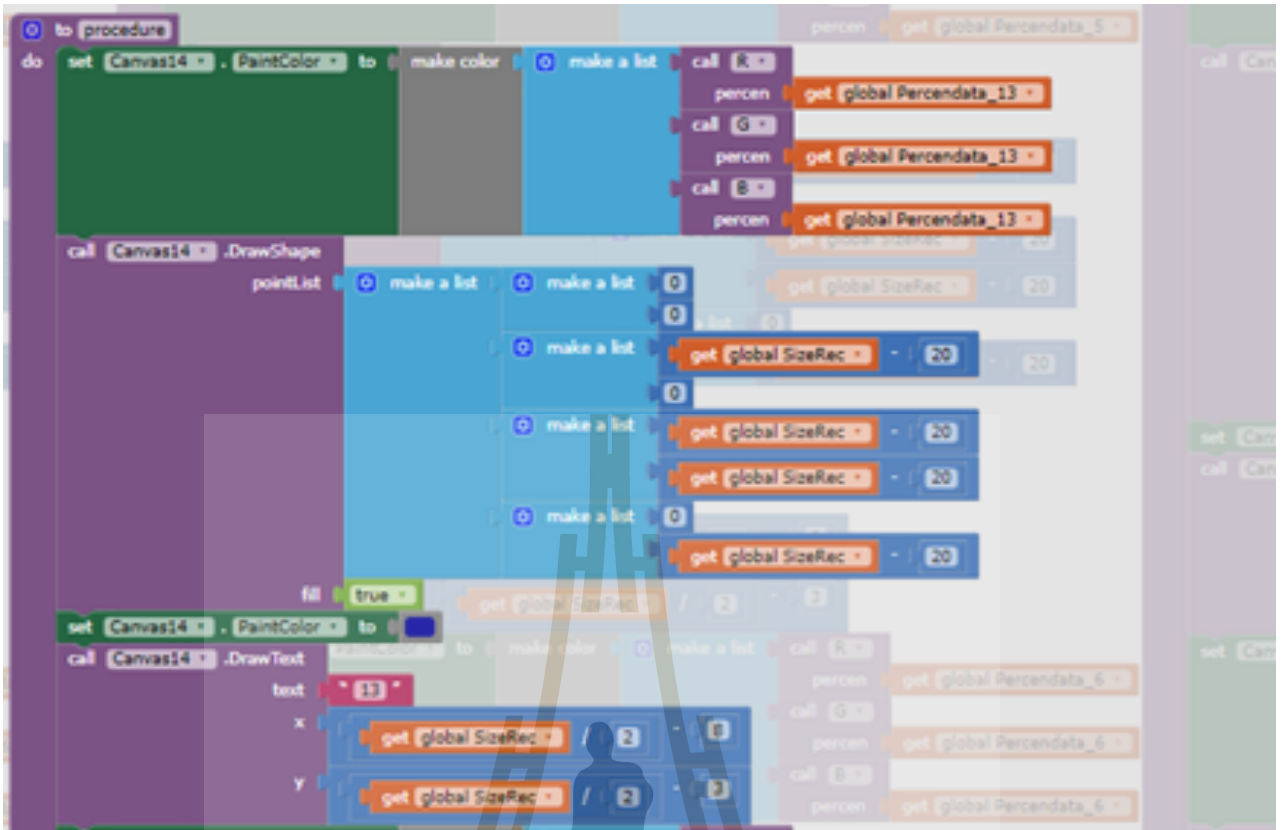


รูปที่ ข.24 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

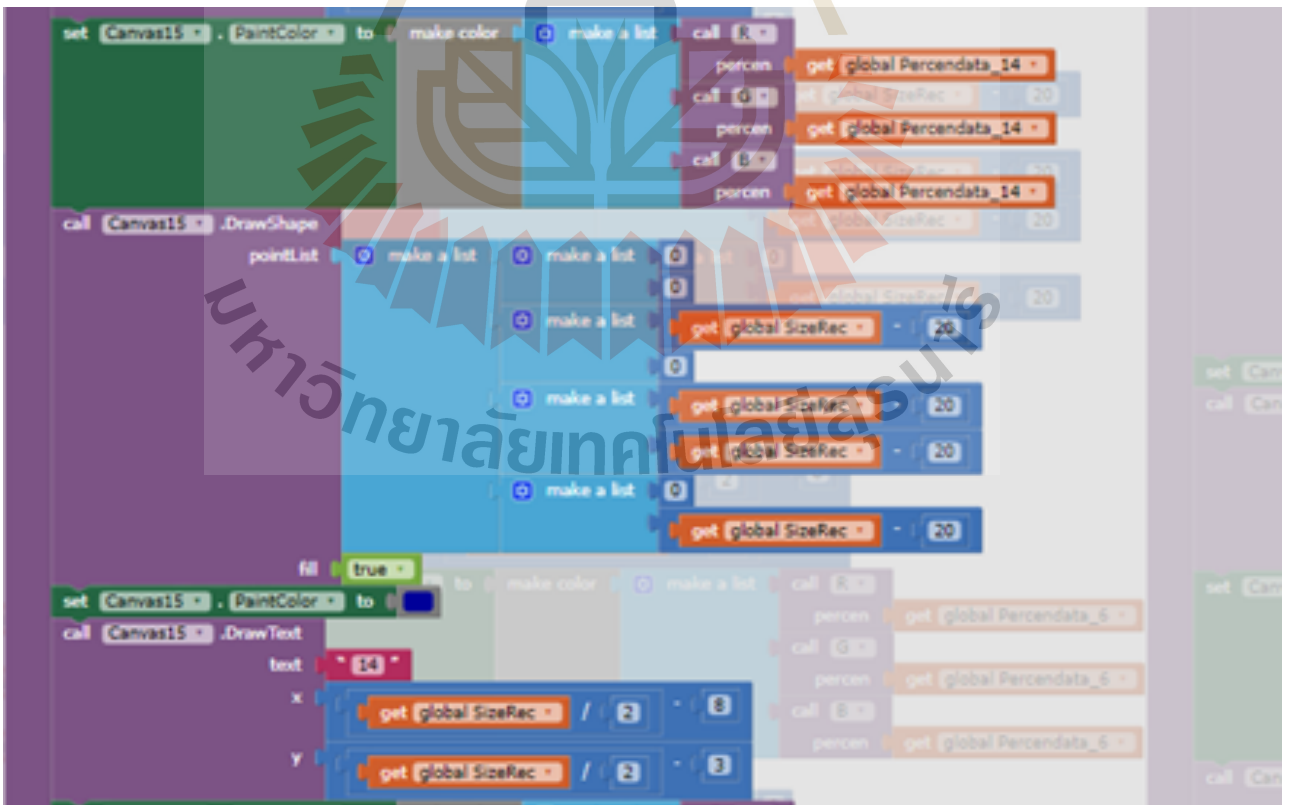


รูปที่ ข.25 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

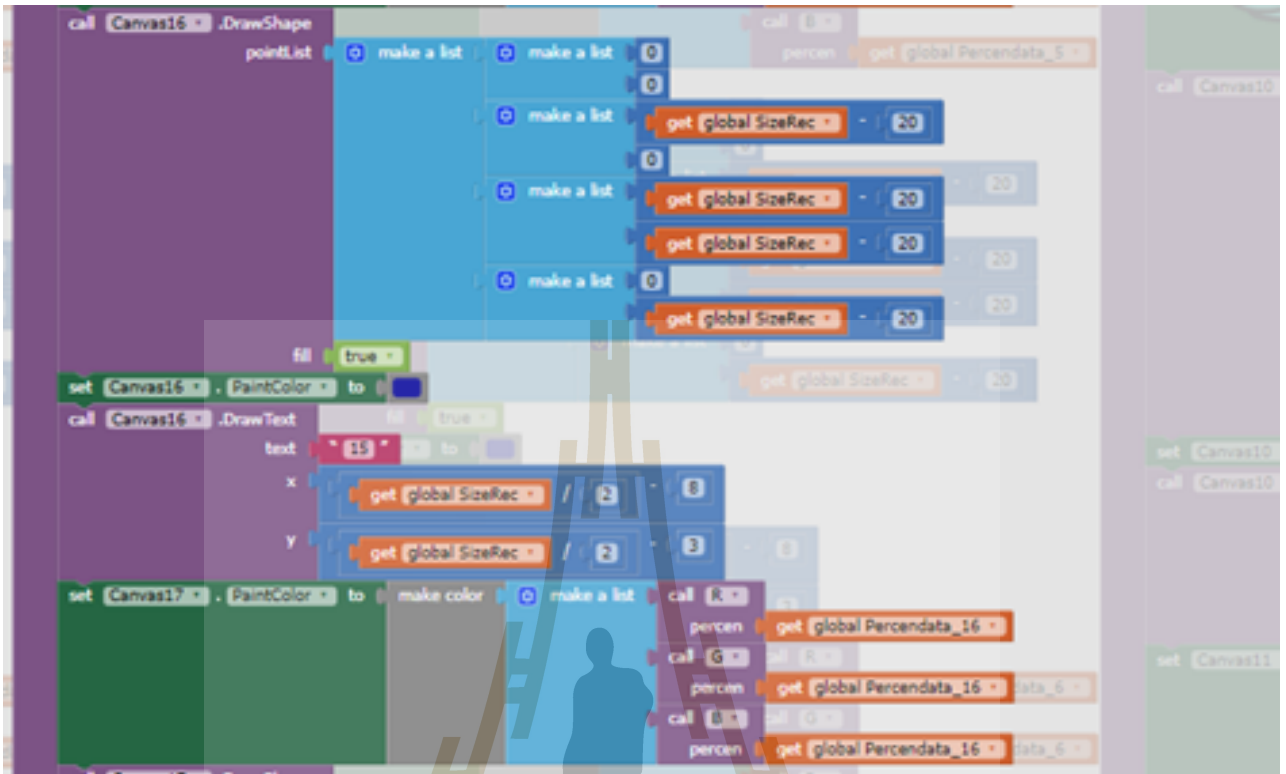




รูปที่ ข.26 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

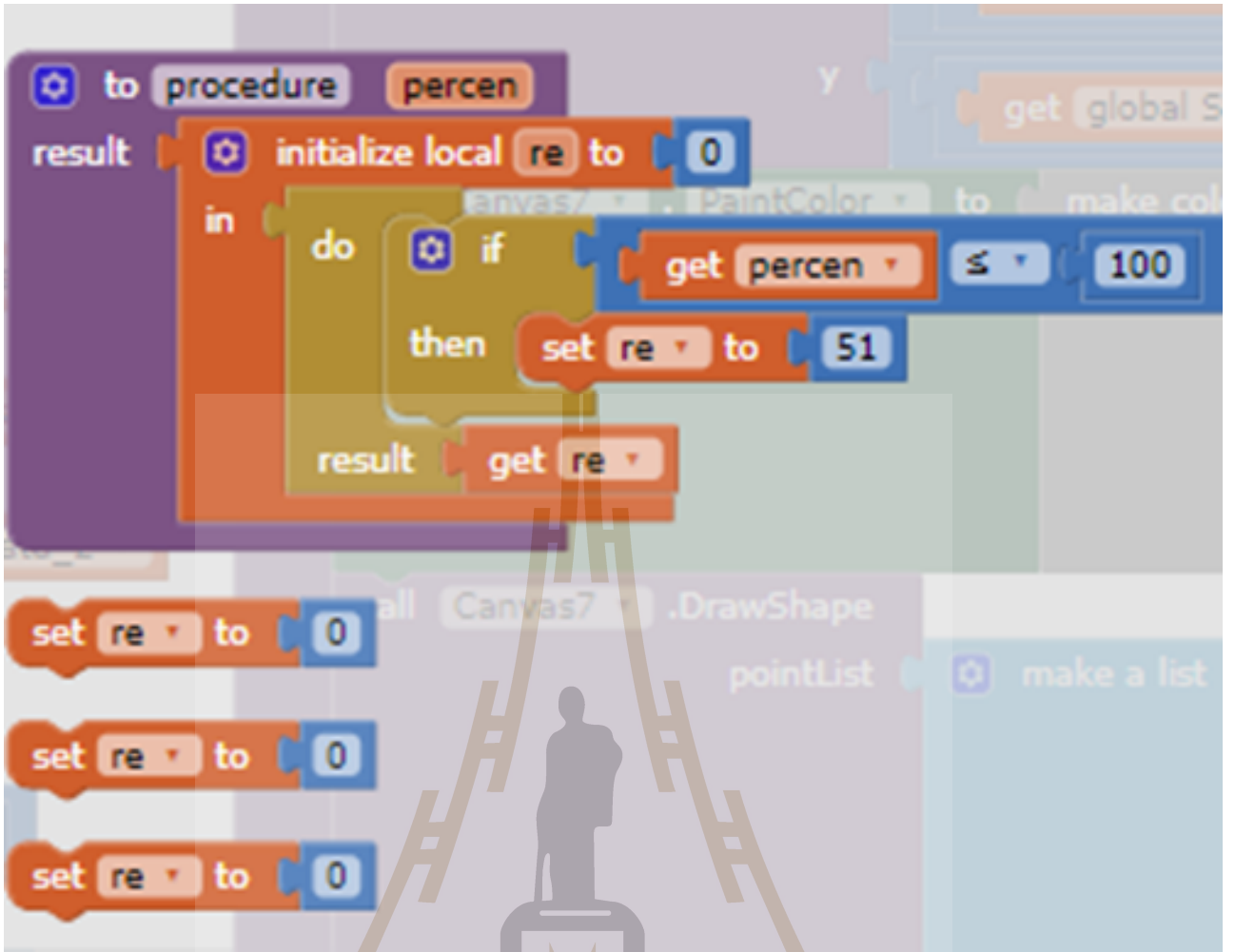


รูปที่ ข.27 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor



รูปที่ ข.28 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor





รูปที่ ข.29 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



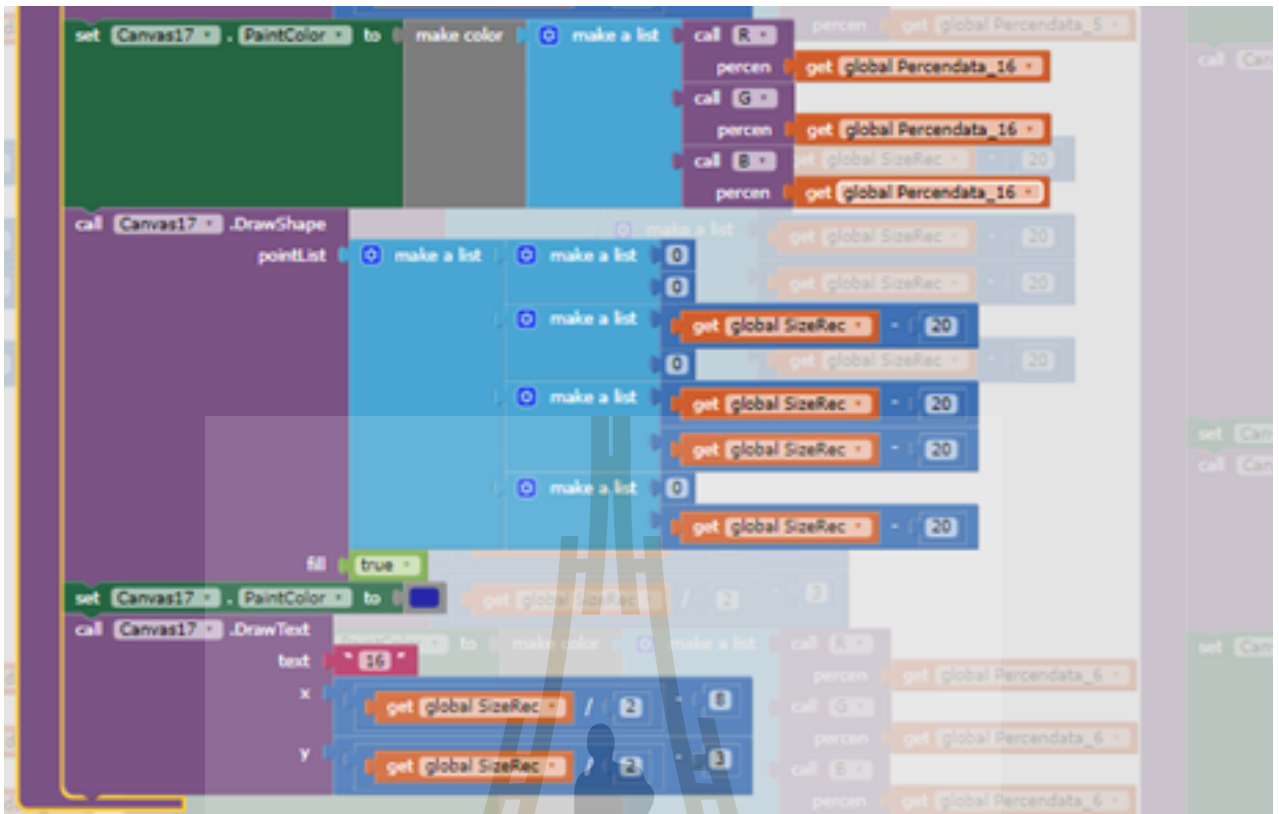
รูปที่ ข.30 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor



The image shows a screenshot of the MIT App Inventor code editor. A procedure named 'percen' is defined. It starts with 'initialize local re to 0'. Then, it enters a 'do' loop with several 'if' and 'else if' conditions. Each condition checks the value of 'percen' against a threshold. If the condition is true, it sets 're' to a calculated value. The calculations involve division, multiplication, and addition of constants. For example, one calculation is $153 / 14 \times \text{get } \text{percen} - 42 + 0$. The final 'result' block is 'get re'.

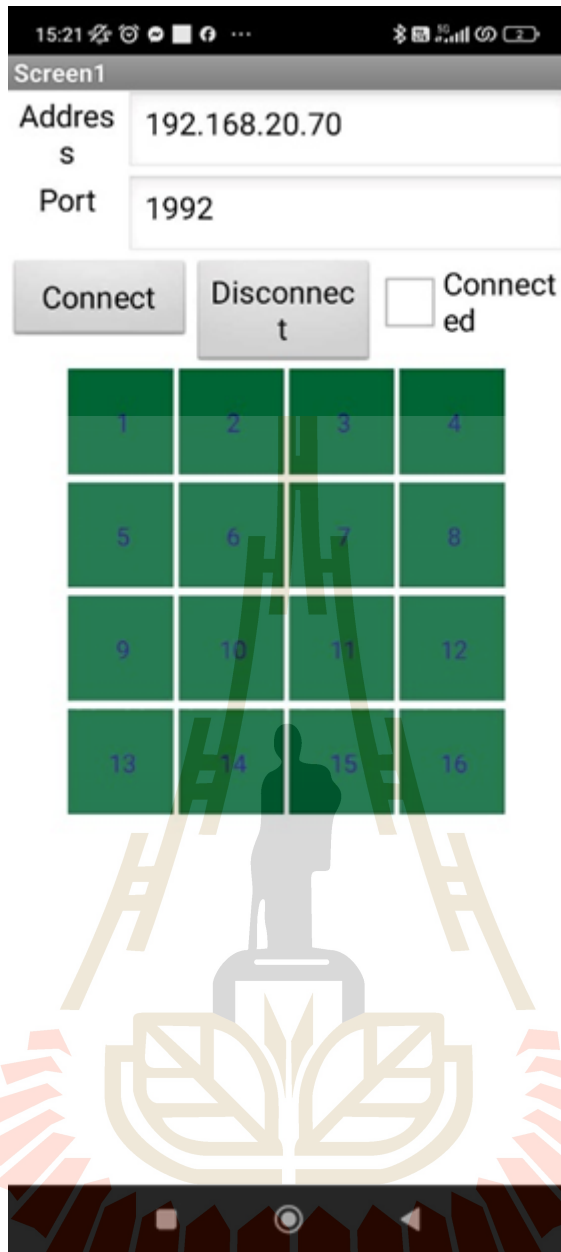
รูปที่ ข.31 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor





รูปที่ ข.32 โปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor





รูปที่ ข.33 หน้าต่างแอปพลิเคชัน ที่สร้างด้วยโปรแกรมคำสั่ง MIT APP Inventor

บรรณานุกรม

1. Pizarro F, Villavicencio P, Yunge D, Rodriguez M, Hermosilla G, Leiva A., Leiva, Easy-to-Build Textile Pressure Sensor. *Sensors* 18 (2018) 1190.
2. Liu F, Qiu X, Xu J, Huang J, Chen D, Chen G, High conductivity and transparency of graphene-based conductive ink: Prepared from a multi-component synergistic stabilization method, *Progress in Organic Coatings* 133 (2019) 125–130.
3. Kou H, Zhang L, Tan Q, Dong H, Zhang W, Xiong J, Wireless wide-range pressure sensor based on graphene/PDMS sponge for tactile monitoring, *Scientific Reports* 9(1) (2019) 3916.
4. Cheng J, Sundholm M, Hirsch M, Lukowicz P, Smart surface: Large scale textile pressure sensor arrays for activity recognition, *Pervasive and Mobile Computing Journal*, Vol. 30, August 2016, pp 97-112.
5. Liu M, Pu X, Jiang C, Liu T, Huang X, Chen l, Du C, Sun J, Hu W, Wang Z, Large area all-textile pressure sensors for monitoring human motion and physiological signals, *Advanced Materials*, Vol. 29, 2017.
6. Sarrafzadeh M, Xu W, Huang M, Raut N, Yadegar B, Assignees: The Regents of the University of California, Medisens Wireless, Inc., Fabric-based pressure sensor arrays and methods for data analysis, Patent No.: US 9271665B2, Date of Patent: March 1, 2016.
7. Kumaresan Y, Ozioko O, Dahiya R, Multifunctional Electronic Skin With a Stack of Temperature and Pressure Sensor Arrays. *IEEE Sensors Council*.2021;21
8. Muller S, Seichter D, Gross H. Cross-Talk Compensation in Low-Cost Resistive Pressure Matrix Sensors. *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*.2019
9. Liu W, Lian J, Feng Z, Mohammed A, Kurwa M. PRESSURE SENSOR ARRAY AND THE METHOD OF MAKING. *United States Patent*.2020

10. Maria Mathea Antonetta B, Peter Z, Jeroen V, Daniele R,Edsger Constant Pieter S.PRESSURE SENSOR.INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNCER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT).2020
11. Håkansson A, Han S, Wang S, Lu J, Braun S, Fahlman M, Berggren M, et al. Effect of (3-glycidyloxypropyl)trimethoxysilane (GOPS) on the electrical properties of PEDOT:PSS films. *Journal of Polymer Science Part B*.2017; 55:814-820.
12. Sharma K R, Srivastava A, Kumari P, Sharma D, Tawale J S. Graphene oxide modified PEDOT:PSS as an efficient hole transport layer for enhanced performance of hybrid silicon solar cells. *Surfaces and Interfaces* 2023;36.
13. Liu X, Xu Z, Iqbal A, Chen M, Ali N. Chemical Coupled PEDOT:PSS/Si Electrode: Suppressed Electrolyte Consumption Enables Long-Term Stability. *Nano-Micro Letters*.2021; 13(54).
14. Aziza M, Halima F S A, Jaafarb J. Preparation and Characterization of Graphene Membrane Electrode Assembly. *Jurnal Teknologi*. 2014; 69(9): 11–14.
15. Hasanzadeh M, Far H S, Haji A, Rosace G. Surface Modification of Polyester/Viscose Fabric with SilicaHydrosol and Amino-Functionalized Polydimethylsiloxane forthe Preparation of a Fluorine-Free Superhydrophobic andBreathable Textile. *Coatings*. 2022;12: 398.