

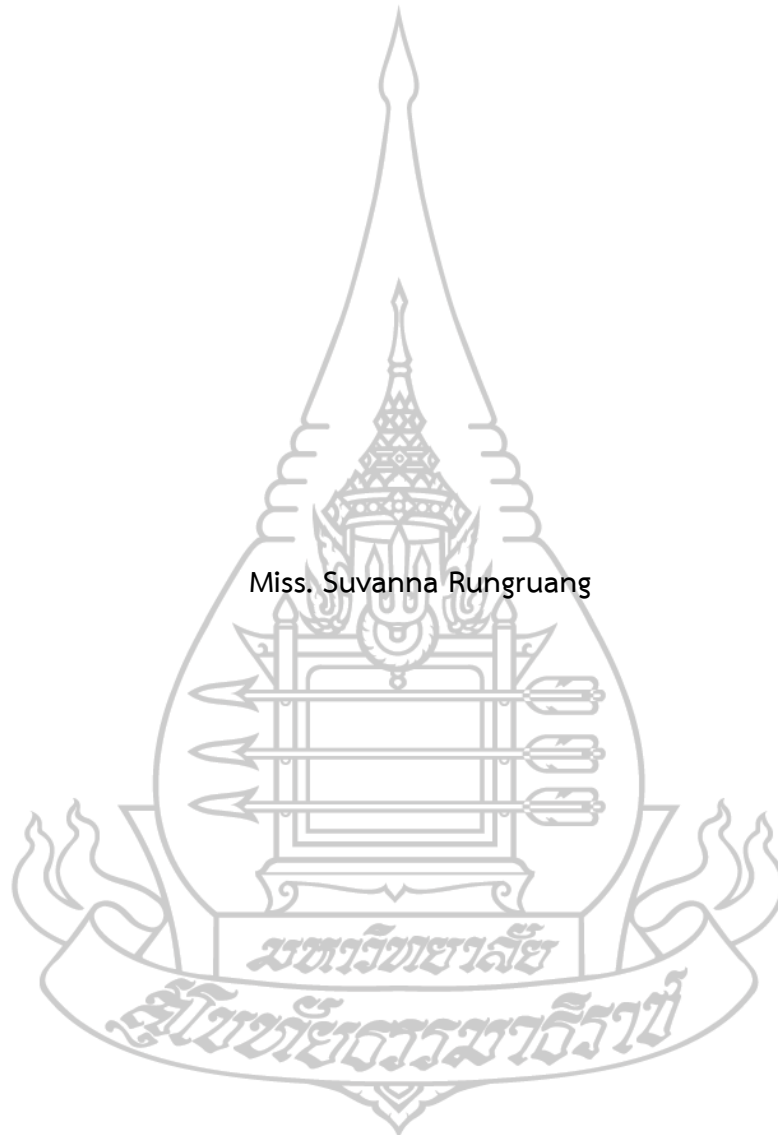
การวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า
เพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า



การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต แขนงวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช

พ.ศ. 2566

Optimal Proportion Analysis of PEDOT: PSS in Conductive Ink for Lamp
Package Application.



An Independent Study Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Science in Industrial Technology
School of Science and Technology Sukhothai Thammathirat Open University

2023

หัวข้อการศึกษาค้นคว้าอิสระ	การวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า
ชื่อและนามสกุล	นางสาวสุวรรณา รุ่งเรือง
แขนงวิชา / วิชาเอก	เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ผกามาศ ผจญแก้ว

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้ได้รับความเห็นชอบให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรระดับปริญญาโท เมื่อวันที่ [26 กุมภาพันธ์ 2564]

คณะกรรมการสอบการศึกษาค้นคว้าอิสระ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ เจือศิริภักดี)

ประธานกรรมการประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชื่อการศึกษาค้นคว้าอิสระ การวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

ผู้ศึกษา นางสาวสุวรรณา รุ่งเรือง รหัสนักศึกษา 2599601008

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีอุตสาหกรรม)

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ผกาภาศ ผจญแก้ว ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สารนำไฟฟ้าเป็น PEDOT:PSS และหาสัดส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนประกอบอื่นในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ได้แก่ Dimethyl Sulfoxide (DMSO) เป็นตัวทำละลายที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ สาร Ethylene Glycol (EG) และสาร Triton x-100 เป็นสารที่ใช้ปรับปรุงความหนืดและแรงตึงผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้านำไฟฟ้า

การวิจัยเป็นการวิจัยเชิงทดลองโดยพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าลงบนแผ่นพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) ด้วยการพิมพ์หมึก ตัวแปรอิสระที่ศึกษา คือสัดส่วนความเข้มข้นของ (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ต่างกันตั้งแต่ 45 : 50 : 4 : 1 จนถึง 90 : 5 : 4 : 1 ตัวแปรตาม คือค่าสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในทุกวินาทีเป็นเวลา 5 นาทีโดยใช้วงจรไฟฟ้ากระแสตรง โปรแกรม LabVIEW อุปกรณ์ NI USB DAQ 6008 และคอมพิวเตอร์แบบพกพา จากนั้นนำไปคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนหมึกพิมพ์ที่ให้ค่าที่ดีที่สุด โครงสร้างบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าได้ถูกออกแบบให้มีแผงวงจรภาพพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบ เพื่อให้บรรจุภัณฑ์สามารถใช้ตรวจสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุได้

ผลการวิจัยพบว่า สัดส่วนที่ดีที่สุดของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดหรือสภาพนำไฟฟ้าสูงสุด คือสาร (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 เท่ากับ 75 : 20 : 4 : 1 และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าเพื่อทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าขณะที่บรรจุได้โดยไม่ต้องนำหลอดไฟฟ้าออกจากบรรจุภัณฑ์

คำสำคัญ หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้า บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

Independent Study title: “Optimal Proportion Analysis of PEDOT: PSS in Conductive Ink for Lamp Package Application.”

Author: “Miss. Suvanna Rungruang”; ID: “2599601008”;

Degree: Master of Science (Industrial Technology)

Independent Study Advisor: Associate Professor Professor Pakamas Pachonklaew;

Academic year: 2023

Abstract

The objectives of this research were to investigate the optimum condition for conductive ink by analyzing the electrical conductivity of conductive inks using Poly (3,4-ethylenedioxythiophene): Poly (styrene sulfonate) (PEDOT: PSS) as conductive material and determining the optimal proportion of PEDOT: PSS conductive ink for lamp packaging application. Other ingredients in the conductive ink included Dimethyl Sulfoxide (DMSO) as the solvent with low electrical resistance, Ethylene Glycol (EG), and Triton X-100 used to improve ink viscosity and surface tension.

The experimental research was done by inkjet printing the conductive ink on the polyethylene terephthalate (PET) substrate. The independent variable was the concentration ratio of (PEDOT: PSS): DMSO: EG: Triton x-100, varying from 45: 50 : 4 :1 to 90 : 5: 4: 1. The dependent variable was the electrical conductivity of the conductive ink. The specific electrical resistance of conductive ink was measured every second for 5 minutes using a DC circuit, LabVIEW program, NI USB DAQ 6008 device, and the portable computer. Then the electrical resistivity and electrical conductivity values were calculated to compare the optimal proportion of the conductive ink ingredients. The lamp packaging structure was designed to include a printed circuit board with conductive ink to inspect the lamp performance in the package.

The results showed that the optimal proportion of conductive inks that gave the lowest electrical resistivity or highest conductivity was PEDOT:PSS: DMSO : EG: Triton x-100 with 75: 20: 4 :1. The conductive ink with that proportion could be applied in the lamp packaging to test the lamp’s function inside the package without taking it out of the package.

Keywords : Conductive ink, Electrical Resistance, Electrical Conductivity, Lamp packaging

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าอิสระเรื่อง การวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ผกา มาศ ผจญ แก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสืบสาย ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและติดตามการทำงานวิจัยในครั้งนี้ นับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุดมเดช ภัคดี อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ และอาจารย์อนัญญา ไทยบุญนาค อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย รวมถึงการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และคณาจารย์สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช เพื่อนักศึกษา และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการศึกษาค้นคว้าอิสระครั้งนี้ทุกท่านที่ได้กรุณาให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดมา



นางสาวสุวรรณา รุ่งเรือง

สารบัญ

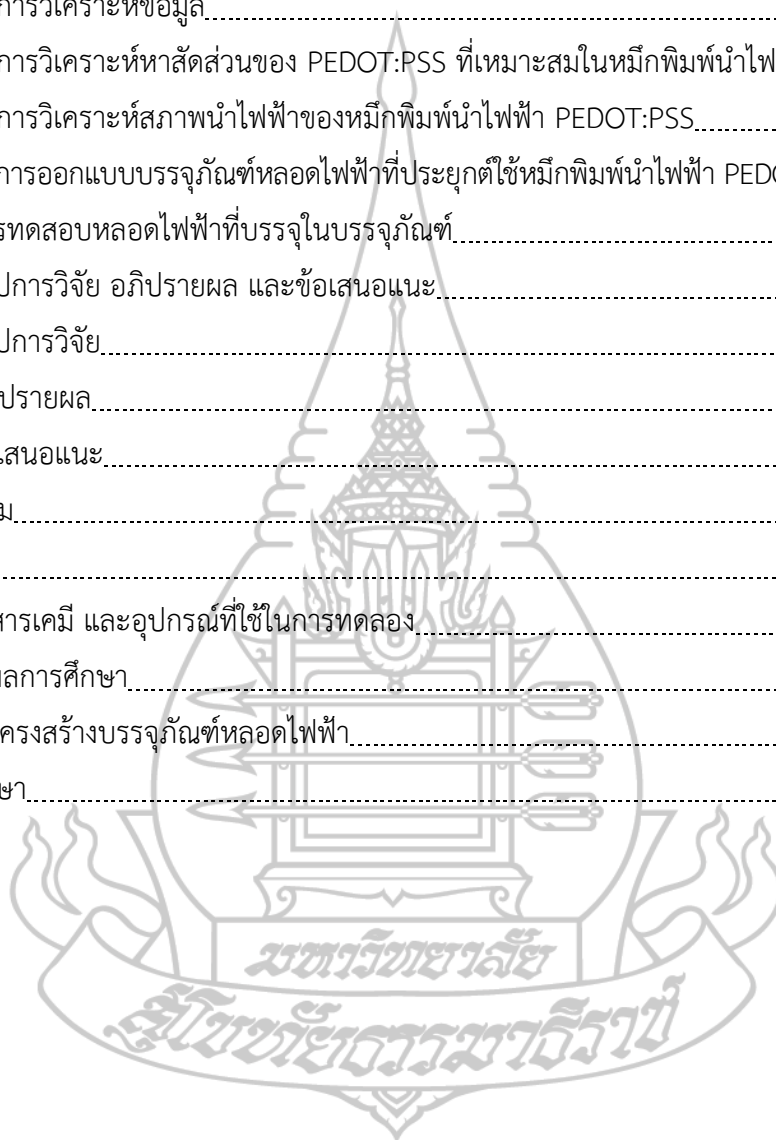
หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
กรอบแนวคิดการวิจัย.....	2
สมมติฐานการวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	7
วงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์.....	10
สภาพนำไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้า.....	13
การพิมพ์พ่นหมึก.....	15
การออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์.....	17
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	35
วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	39
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	41
ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS.....	52
ผลการออกแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าที่ประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS.....	56
การทดสอบหลอดไฟฟ้าที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์.....	59
บทที่ 5 สรุปการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	63
สรุปการวิจัย.....	63
อภิปรายผล.....	64
ข้อเสนอแนะ.....	66
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก.....	70
ก สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	71
ข ผลการศึกษา.....	80
ค โครงสร้างบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า.....	98
ประวัติผู้ศึกษา.....	103



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	สัดส่วนหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมในการทดลอง.....	37
ตารางที่ 4.1	สัดส่วนหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS.....	43
ตารางที่ 4.2	ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ใน 10 สัดส่วน.....	50
ตารางที่ 4.3	ค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในสัดส่วนต่าง ๆ.....	53
ตารางที่ ข.1	ค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในสัดส่วนต่าง ๆ.....	96



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1	กรอบแนวคิดการวิจัย.....	3
ภาพที่ 2.1	โครงสร้างพอลิเมอร์ PEDOT:PSS.....	9
ภาพที่ 2.2	การพิมพ์วงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบต่าง ๆ.....	11
ภาพที่ 2.3	การแพร่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำ.....	14
ภาพที่ 2.4	แผนภาพกระบวนการพิมพ์แบบพ่นหมึก.....	15
ภาพที่ 2.5	ส่วนประกอบต่าง ๆ บนโครงสร้างบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ.....	23
ภาพที่ 2.6	รูปทรงกล่องกระดาษพับได้.....	24
ภาพที่ 2.7	ลักษณะการยึดติดเป็นตัวกล่องกระดาษพับได้.....	25
ภาพที่ 2.8	กล่องแบบฝาติดกาว.....	26
ภาพที่ 2.9	รูปแบบกล่องแบบฝาสอด.....	27
ภาพที่ 2.10	รูปแบบกล่องแบบฝาล็อก.....	27
ภาพที่ 2.11	แผนภาพแถบพลังงานที่รอยต่อระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะเมื่อ (ก) ไม่มี และ (ข) มีโมเลกุลแก๊สมาติดที่พื้นผิวสาร PEDOT:PSS.....	29
ภาพที่ 2.12	แผนภาพการเตรียมตัวอย่าง (ก) การพิมพ์ขั้วไฟฟ้าเงินด้วยวิธีการพิมพ์แบบสกรีน และ (ข) การพิมพ์สาร Graphene-PEDOT:PSS ด้วยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก.....	30
ภาพที่ 2.13	หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes; CNTs) และสารลดแรงตึงผิว.....	31
ภาพที่ 2.14	การทดสอบการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ CNT-SDBS.....	31
ภาพที่ 2.15	การพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสาร PEDOT และกราฟีนลงบนแผ่นรองรับ PET ที่มีขั้วไฟฟ้าเงินด้วยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก.....	32
ภาพที่ 2.16	หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสารโลหะทังสเตนออกไซด์ (tungsten oxide; WO ₃) และสาร PEDOT:PSS พิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ PI ด้วยวิธีการพิมพ์แบบกราเวียร์.....	33
ภาพที่ 2.17	การประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าโลหะออกไซด์สำหรับบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ.....	33
ภาพที่ 2.18	การประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าพอลิเมอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ.....	34
ภาพที่ 3.1	ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง.....	40
ภาพที่ 4.1	ภาพพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS บนแผ่นพลาสติก PET.....	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.2	ภาพถ่าย SEM แบบภาคตัดขวางแสดงความหนาของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS.....	42
ภาพที่ 4.3	ภาพพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสัดส่วน (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ใน 10 สัดส่วน.....	43
ภาพที่ 4.4	ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรงใช้วัดความต้านทานไฟฟ้าของภาพพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	44
ภาพที่ 4.5	โปรแกรม LabVIEW2018 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากภาพพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	44
ภาพที่ 4.6	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S1) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG :Triton x-100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1.....	45
ภาพที่ 4.7	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S2) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 50 : 45 : 4 : 1.....	45
ภาพที่ 4.8	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S3) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG :Triton x-100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1.....	46
ภาพที่ 4.9	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S4) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1.....	46
ภาพที่ 4.10	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S5) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG :Triton x-100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1.....	47
ภาพที่ 4.11	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S6) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1.....	47
ภาพที่ 4.12	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S7) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG :Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1.....	48
ภาพที่ 4.13	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน(S8) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1.....	48
ภาพที่ 4.14	กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S9) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 85 : 15 : 4 : 1.....	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S10) (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1.....	49
ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS 10 สัดส่วน.....	51
ภาพที่ 4.17 แผนภาพแสดงความยาว ความกว้าง และความหนาของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่พิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติก PET.....	52
ภาพที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	55
ภาพที่ 4.19 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของตัวพาหะโฮล (h ⁺) ผ่านหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	56
ภาพที่ 4.20 โครงสร้างภายนอกบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า.....	57
ภาพที่ 4.21 โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าที่ออกแบบ.....	58
ภาพที่ 4.22 ลายเส้นวงจรรนำไฟฟ้าในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2.....	59
ภาพที่ 4.23 การทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าโดยใช้โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์.....	60
ภาพที่ 4.24 ภาพจำลองการประกอบโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์กับกล่องบรรจุภัณฑ์ ภายนอก เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม IC3D.....	61
ภาพที่ 4.25 ต้นแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ภายในกล่องบรรจุภัณฑ์เพื่อใช้ทดสอบหลอดไฟฟ้า.....	61
ภาพที่ 4.26 ภาพถ่ายแสดงการทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุในต้นแบบ บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า.....	62
ภาพที่ ก.1 พอลิเมอร์ PEDOT:PSS.....	72
ภาพที่ ก.2 Dimethyl Sulfoxide (DMSO).....	72
ภาพที่ ก.3 Ethylene Glycol (EG).....	73
ภาพที่ ก.4 Triton x-100.....	73
ภาพที่ ก.5 ไมโครปิเปต.....	74
ภาพที่ ก.6 เครื่องกวนสาร.....	74
ภาพที่ ก.7 เครื่องมัลติมิเตอร์.....	75
ภาพที่ ก.8 เครื่องล้างความถี่เหนือเสียง GT Ultrasonic Cleaner.....	75
ภาพที่ ก.9 เครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Inkjet) ยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112.....	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ก.10	ตลับหมึกเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Inkjet) ยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112.....	76
ภาพที่ ก.11	แผ่นพลาสติกประเภท PET.....	77
ภาพที่ ก.12	ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง.....	77
ภาพที่ ก.13	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	78
ภาพที่ ก.14	โปรแกรม LabVIEW 2018.....	78
ภาพที่ ก.15	โปรแกรม ImageJ.....	79
ภาพที่ ข.1	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	81
ภาพที่ ข.2	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	81
ภาพที่ ข.3	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	82
ภาพที่ ข.4	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 50 : 45 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	82
ภาพที่ ข.5	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 50 : 45 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	83
ภาพที่ ข.6	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 50 : 45 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	83
ภาพที่ ข.7	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	84
ภาพที่ ข.8	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	84
ภาพที่ ข.9	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	85
ภาพที่ ข.10	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สีดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	85

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.11	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	86
ภาพที่ ข.12	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	86
ภาพที่ ข.13	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	87
ภาพที่ ข.14	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	87
ภาพที่ ข.15	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	88
ภาพที่ ข.16	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	88
ภาพที่ ข.17	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	89
ภาพที่ ข.18	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	89
ภาพที่ ข.19	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	90
ภาพที่ ข.20	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	90
ภาพที่ ข.21	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	91
ภาพที่ ข.22	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	91
ภาพที่ ข.23	ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	92

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.24 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	92
ภาพที่ ข.25 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	93
ภาพที่ ข.26 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	93
ภาพที่ ข.27 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	94
ภาพที่ ข.28 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1.....	94
ภาพที่ ข.29 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2.....	95
ภาพที่ ข.30 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3.....	95
ภาพที่ ค.1 โครงสร้างภายนอกบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า.....	99
ภาพที่ ค.2 โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 1.....	99
ภาพที่ ค.3 โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2.....	100
ภาพที่ ค.4 ลายเส้นวงจรรนำไฟฟ้าในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2.....	100
ภาพที่ ค.5 ลายเส้นวงจรรนำไฟฟ้าเมื่อขึ้นรูปแผ่นพลาสติก PET ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2.....	101
ภาพที่ ค.6 การประกอบโครงสร้างภายในส่วนที่ 1 และ โครงสร้างภายในส่วนที่ 2.....	101
ภาพที่ 6.7 บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า.....	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยในปัจจุบันได้มีการนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า (conductive ink) มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ จอภาพอิเล็กทรอนิกส์ ตกแต่งภายในอาคาร การแพทย์ และพัฒนาสิ่งพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในด้านการเข้าถึงข้อมูลได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ปัจจุบันมีการพัฒนาสารนำไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่นำมาเป็นส่วนผสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เช่น หมึกพิมพ์ซิลเวอร์นาโน (nano-silver conductive ink) หมึกพิมพ์ทองแดงนำไฟฟ้า (copper conductive ink) หมึกพิมพ์ท่อนาโนคาร์บอนนำไฟฟ้า (nanotube carbon conductive ink) และหมึกพิมพ์กราฟีนนำไฟฟ้า (graphene conductive ink) เป็นต้น การพัฒนาสารนำไฟฟ้าเพื่อให้มีสมบัติด้านนำไฟฟ้าดีขึ้นสามารถนำไปติดตั้งเข้ากับวัสดุ โครงสร้าง ตลอดจนพื้นผิวต่าง ๆ โดยไม่ต้องใช้แผ่นวงจรพิมพ์หรือสายไฟ และลดต้นทุนในการผลิต ทำให้เกิดทางเลือกใหม่ของการใช้งานโดยลดข้อจำกัดต่าง ๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ส่วนต่าง ๆ ได้มากขึ้น

สาร poly (3,4 -ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) หรือ PEDOT:PSS เป็นสารพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วน poly(styrenesulfonate) หรือ PSS ทำหน้าที่ยึดติดกับสารเคมีชนิดอื่น และส่วน Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) หรือ PEDOT ทำหน้าที่นำไฟฟ้า ทำให้สาร PEDOT:PSS จึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี มีสมบัติละลายน้ำได้ดี สามารถใช้เคลือบบนวัสดุต่าง ๆ ได้ อีกทั้งยังมีราคาถูกกว่าสารนำไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ รวมถึงการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ในรูปแบบใหม่ที่เน้นทางด้านความสะดวกสบายต่อผู้บริโภค มีการเปลี่ยนรูปแบบบรรจุภัณฑ์แบบเดิม ๆ ที่มีหน้าที่เพียงปกป้องสินค้า หรือมีแค่ความสวยงาม แต่บรรจุภัณฑ์ได้นำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่มาผสมผสานกับบรรจุภัณฑ์เพื่อให้สามารถแสดงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์บรรจุได้ด้วย ผู้ศึกษาได้สนใจปัญหาของผู้ซื้อหลอดไฟฟ้าที่ต้องการทดสอบการใช้งานของหลอดไฟฟ้าก่อนตัดสินใจซื้อ ดังนั้นร้านค้าในห้างสรรพสินค้าหรือซูเปอร์มาร์เก็ตจึงต้องมีการติดตั้งระบบไฟฟ้าพร้อมเต้าเสียบหลอดไฟฟ้าที่อำนวยความสะดวกลูกค้าสามารถทดสอบหลอดไฟฟ้าได้ก่อนตัดสินใจซื้อ โดยลูกค้าหรือเจ้าหน้าที่ของห้างสรรพสินค้าจะต้องแกะกล่องบรรจุหลอดไฟฟ้า และนำหลอดไฟฟ้าออกจากกล่อง เพื่อนำมาทดสอบกับเต้าเสียบหลอดไฟฟ้าที่ต่อกับระบบไฟฟ้า

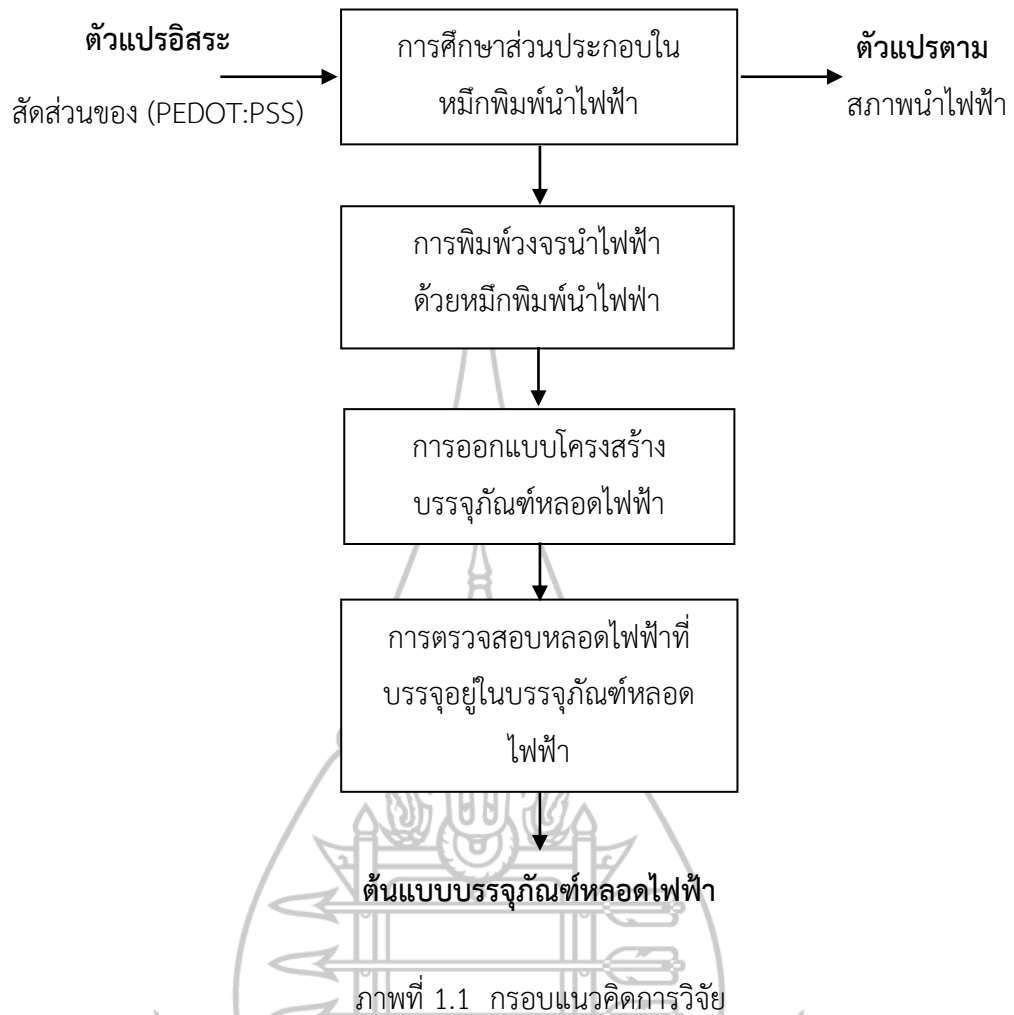
ด้วยเหตุนี้ ผู้ศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะนำสารนำไฟฟ้า PEDOT:PSS มาพัฒนาเป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสำหรับบรรจุภัณฑ์บรรจุหลอดไฟฟ้า โดยมีส่วนประกอบอื่นในหมึกพิมพ์ ได้แก่ สาร Dimethyl Sulfoxide (DMSO) เป็นตัวทำละลาย สาร Ethylene Glycol (EG) สารป้องกันการแข็งตัว และสาร Triton x-100 เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ โดยวิเคราะห์หาในสัดส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าสามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุได้ก่อนที่ผู้ใช้จะซื้อจากร้านค้าหรือห้างสรรพสินค้าที่กำหนด โดยไม่ต้องแกะกล่องเพื่อนำหลอดไฟฟ้าออกมาทดสอบกับปลั๊กไฟ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบต่าง ๆ ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้ PEDOT:PSS เป็นสารนำไฟฟ้า เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สารนำไฟฟ้า PEDOT:PSS
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาต้นแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าที่สามารถทดสอบการทำงานหลอดไฟฟ้าได้

1.3 กรอบแนวคิดการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราส่วนของสาร PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่นำมาผสมเป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าโดยเน้นสัดส่วนของสาร PEDOT:PSS ในหมึกพิมพ์ จากนั้นนำมาใช้พิมพ์เป็นวงจรนำไฟฟ้าด้วยการพิมพ์พ่นหมึก (inkjet printing) บนฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate : PET) และนำมาใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า โดยมีการออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของวงจรนำไฟฟ้าพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า และมีการตรวจสอบคุณภาพของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุอยู่ภายในได้ ดังแสดงในภาพที่ 1.1



1.4 สมมติฐานการวิจัย

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้สาร PEDOT:PSS ในสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถนำมาใช้เป็น ส่วนประกอบในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า เพื่อทดสอบคุณภาพของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุอยู่ภายในได้

ตัวแปรอิสระ คือ สัสดส่วนของ PEDOT:PSS ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ตัวแปรตาม คือ สภาพนำไฟฟ้า

ตัวแปรควบคุม คือ วัสดุพิมพ์เป็นแผ่นพลาสติก PET ปริมาณของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า อุณหภูมิห้อง และอัตราส่วนของ EG : Triton x-100

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

ในการศึกษางานวิจัย เรื่อง การวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า มีการกำหนดขอบเขตของงานวิจัย ดังนี้

1.5.1 พอลิเมอร์ PEDOT:PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate)) เป็นสารทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในหมึกพิมพ์ ในการวิจัยนี้ ใช้พอลิเมอร์ PEDOT:PSS ที่มีลักษณะเป็นของเหลว ความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ผสมสัดส่วนของพอลิเมอร์ PEDOT:PSS ในส่วนประกอบของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแตกต่างกัน ตั้งแต่ร้อยละ 45 – 90

1.5.2 การพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มี PEDOT:PSS สัดส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (inkjet printer) บนแผ่นพลาสติก PET ที่มีความหนา 0.5 ไมโครเมตรโดยในแต่ละสัดส่วนทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้า และนำค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าไปคำนวณเป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนของ PEDOT:PSS ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ให้สภาพนำไฟฟ้าสูงที่สุด

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

ในการศึกษางานวิจัย เรื่อง การวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า มีการกำหนดข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย ดังนี้

1.6.1 พอลิเมอร์ PEDOT:PSS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Sigma - Aldrich

1.6.2 เครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เป็นเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Inkjet) ยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112 โดย พิมพ์บนพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)

1.6.3 การพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS แต่ละสัดส่วนได้พิมพ์จำนวน 5 ครั้ง บนแผ่นพลาสติก PET ก่อนนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานไฟฟ้า

1.6.4 โปรแกรมที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้า คือ โปรแกรม LabVIEW 2018

1.6.5 หลอดไฟที่ใช้ทดสอบ เป็นหลอดไฟชนิด LED ความต่างศักย์ ไฟฟ้า 12 โวลต์ ชนิดกระแสตรง (DC 12V) กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.7.1 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า หมายถึง หมึกพิมพ์ที่มีความสามารถในการเป็นสื่อนำไฟฟ้าได้

1.7.2 พอลิเมอร์ PEDOT: PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly (styrene sulfonate)) หมายถึง พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ซึ่งมีไอออนเมอร์สองตัว ประกอบด้วย PEDOT หรือ พอลิ (3,4 เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน) (poly(3,4- ethylenedioxythiophene) เป็นพอลิเมอร์แบบคอนจูเกตที่มีประจุบวก และ PSS หรือโซเดียมพอลิสไตรีนซัลโฟเนต (poly(styrenesulfonate)) ซึ่งมีกลุ่มซัลโฟนิลที่ถูกลดโปรตอนทำให้มีประจุลบ งานวิจัยนี้ใช้พอลิเมอร์ PEDOT:PSS เป็นสารนำไฟฟ้าในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

1.7.3 DMSO (dimethyl sulfoxide) หรือไดเมทิลซัลฟอกไซด์ หมายถึง ตัวทำละลายอะโพรติก (aprotic solvent) ที่ไม่มีขั้ว สามารถละลายสารประกอบที่มีขั้ว สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์หลายชนิดได้ ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นตัวทำละลายในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

1.7.4 EG (ethylene glycol) หรือ เอทิลีนไกลคอล หมายถึง สารประกอบอินทรีย์ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นสารป้องกันการแข็งตัว (anti-freeze agent) ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

1.7.5 Triton x-100 หรือ ไตรตัน เอ็กซ์ 100 หมายถึง สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ ใช้เป็นสารป้องกันการแข็งตัวจากความเย็น (anti-freeze) ทำให้อิมัลชันมีความคงตัว ป้องกันไม่ให้เกิดการแยกชั้นของของเหลว ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

1.7.6 PET (polyethylene terephthalate) หมายถึง พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต ซึ่งเป็นเทอร์โมพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ระหว่างกรดเทเรพทาลิก (terephthalic acid, TPA) กับเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นวัสดุรองรับการพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

1.7.7 ความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistance) หมายถึง สมบัติของตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้มากน้อยต่างกัน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm)

1.7.8 สภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) หมายถึง ปริมาณการวัดของการต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าในวัสดุ ถ้าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ แสดงว่าวัสดุยินยอมให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ง่าย ตรงกันข้าม ถ้าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง แสดงว่า Electrical Resistivity วัสดุยินยอมให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$)

1.7.9 สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity) หมายถึง ความสามารถของสารที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน สภาพนำไฟฟ้าแปรผกผันกับสภาพต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (โอห์ม·เมตร)⁻¹ ($\Omega \cdot m$)⁻¹

1.7.10 ต้นแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ (packaging prototype) หมายถึง แบบจำลองลักษณะรูปทรงบรรจุภัณฑ์ ที่มีรายละเอียดโครงสร้างใกล้เคียงกับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้จริง เพื่อใช้ในการทดสอบหรือทดลองเพื่อหาข้อบกพร่องและดำเนินการแก้ไขก่อนที่จะผลิตเพื่อใช้งานจริงต่อไป

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สัดส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบต่าง ๆ ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้ PEDOT:PSS เป็นสารนำไฟฟ้า เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า เพื่อทดสอบหลอดไฟฟ้าขณะที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ โดยไม่ต้องแกะบรรจุภัณฑ์เพื่อนำหลอดไฟฟ้าออกมาทดสอบ



บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย โดยศึกษาแนวคิด ทฤษฎี หลักการ และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ สภาพนำไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้า ระบบการพิมพ์พ่นหมึก การออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะด้านโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ มาพิจารณาถึงแนวทางทางการทำวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งผู้วิจัยมุ่งหมายศึกษาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้า และหาสัดส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ซึ่งวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

2.1 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เป็นหมึกพิมพ์ที่ผลิตขึ้นมาจากวัสดุหลากหลายประเภทที่มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น อนุภาคโลหะนาโนที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ได้แก่ อนุภาคโลหะเงิน และทองแดง แต่ว่าพื้นผิวของโลหะดังกล่าว เกิดปฏิกิริยาได้ดีกับออกซิเจน จึงเกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย มีผลทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง นอกจากนี้สามารถใช้คาร์บอน และพอลิเมอร์เป็นวัสดุนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดีและมีต้นทุนที่ต่ำกว่าอนุภาคโลหะนาโน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ได้แก่ หมึกพิมพ์อนุภาคโลหะนาโน หมึกพิมพ์คาร์บอน และหมึกพิมพ์พอลิเมอร์

2.1.1 หมึกพิมพ์อนุภาคโลหะนาโน

อนุภาคโลหะนาโนที่นำมาใช้เป็นสารนำไฟฟ้าในหมึกพิมพ์ ได้แก่ ทองคำ (Gold; Au) เงิน (Silver; Ag) ทองแดง (Copper; Cu) อะลูมิเนียม (Aluminum; Al) และนิกเกิล (Nickel; Ni) เนื่องจากอนุภาคโลหะนาโนดังกล่าวมีค่าการนำไฟฟ้าสูง โดยค่าการนำไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าโลหะชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่ามาตรฐานนาโน

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติด้านความเสถียร หมึกพิมพ์อนุภาคโลหะเงินนาโน มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง และมีความเสถียรมากกว่าโลหะอื่น ๆ โดยที่ค่าการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์โลหะเงินนาโนจะเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเวลาเปลี่ยนไป นอกจากนี้หมึกพิมพ์อนุภาคโลหะเงินนาโนสามารถนำไปใช้พิมพ์ลงบนแผ่นรองรับได้หลากหลาย เช่น พอลิเอไมด์ (polyimide; PI) พอลิเอทิลีนแนฟทาเลต (polyethylene naphthalate; PEN) พอลิอีเทอร์ซัลโฟน (polyethersulfone; PES) พอลิ

เอทิลีนเทเรพทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) และกระดาษ (paper) โดยหมึกพิมพ์อนุภาคโลหะเงินนาโน สามารถนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้า หรือส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า และประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น เสาอากาศ (antenna) การระบุเอกลักษณ์ด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification; RFID) ทรานซิสเตอร์ฟิล์มบาง (thin-film transistor) อุปกรณ์เปล่งแสง (Light Emitting Device) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เซ็นเซอร์ (sensor) และแผงหน้าจอสัมผัส (touch screen panel) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของหมึกพิมพ์อนุภาคโลหะเงินนาโน คือ ต้นทุนที่สูง ทำให้เป็นอุปสรรคในการนำหมึกพิมพ์อนุภาคโลหะเงินนาโนไปใช้ในกระบวนการผลิตขนาดใหญ่และจำนวนมากอย่างระบบอุตสาหกรรม (Kastner และคณะ, 2017)

ส่วนหมึกพิมพ์อนุภาคโลหะทองแดงนาโน มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าหมึกพิมพ์อนุภาคโลหะเงินนาโน เนื่องจากโลหะทองแดงมีจำนวนมาก และมีต้นทุนเพียงร้อยละ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนของโลหะเงิน ขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับโลหะเงิน และมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าโลหะทองคำ ดังนั้นโลหะทองแดงจึงเป็นสารนำไฟฟ้าที่น่าสนใจในการนำมาผสมสำหรับการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น อนุภาคโลหะทองแดงนาโน ขนาด 45 นาโนเมตร ผสมในพอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (polyvinylpyrrolidone; PVP) โดยใช้ตัวทำละลายเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol; EG) เมื่อนำไปเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ทำให้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เท่ากับ 17.2 ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร อย่างไรก็ตาม การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ได้ง่ายบนพื้นผิวของทองแดง ก่อให้เกิดชั้นออกไซด์ ได้แก่ คิวปริสออกไซด์ (cuprous oxide; Cu_2O) และคิวปริกอออกไซด์ (cupric oxide; CuO) มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของชั้นงานพิมพ์มีค่าลดลง (Li และคณะ, 2019)

จากที่กล่าวมา ข้อจำกัดของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าอนุภาคโลหะนาโนที่สำคัญ คือ ต้นทุนการผลิต และการเกิดชั้นออกไซด์ได้ง่าย นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามพัฒนาแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยเลือกใช้วัสดุโลหะที่มีต้นทุนต่ำ และเพิ่มกระบวนการเตรียม เช่น การใช้ความร้อน การใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม การเพิ่มความดัน การเผาผนึกโดยใช้แสง เลเซอร์ และพลาสมา มาแก้ไขเพื่อให้การเกิดชั้นออกไซด์บนผิวโลหะน้อยลง และค่าการนำไฟฟ้ามีความเสถียร

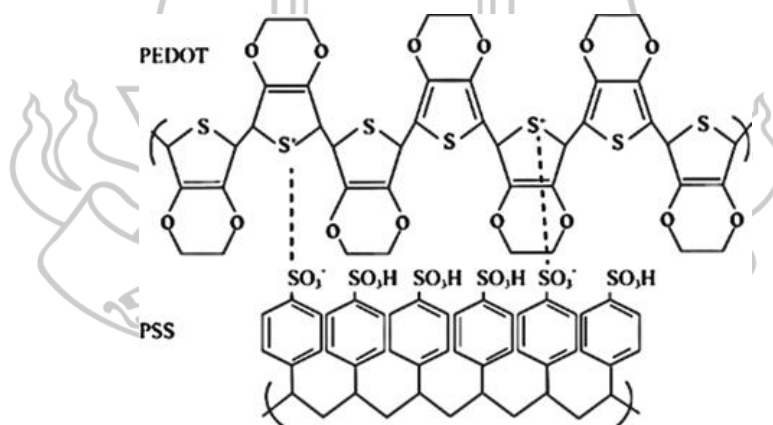
2.1.2 หมึกพิมพ์คาร์บอน

วัสดุคาร์บอน (carbon-based materials) มีหลากหลายอัญรูป (allotrope) ได้แก่ เพชร แกรไฟต์ (graphite) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) และกราฟีน (graphene) ซึ่งมีจุดเด่นด้านพื้นที่ผิวสูง บางอัญรูปมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง เหมาะแก่การนำไปผสมเป็นส่วนประกอบในหมึกพิมพ์ เพื่อให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ขณะที่หมึกพิมพ์คาร์บอนมีต้นทุนการเตรียมที่ต่ำ เหมาะแก่การนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจำนวนมาก อีกทั้งวัสดุคาร์บอนมีความเสถียรเชิงกล

(mechanical stability) ความสามารถในการพิมพ์ (printability) จึงสามารถนำไปใช้เป็นสารนำไฟฟ้าในหมึกพิมพ์ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของหมึกพิมพ์คาร์บอน คือ ขั้นตอนการเตรียม เนื่องจาก การกระจายตัวได้ไม่ดีของคาร์บอนในสารละลาย หรือตัวทำละลายต่าง ๆ ซึ่งนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญ ในการเตรียมหมึกพิมพ์ การพัฒนาหมึกพิมพ์คาร์บอนให้สามารถกระจายตัวได้ดีในสารละลายสามารถทำได้โดยการแนบหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (carboxyl group; COOH) ลงบนพื้นผิวของวัสดุคาร์บอน ทำให้มีความสามารถในการกระจายตัวดีขึ้นในสารละลาย (Arbab และคณะ, 2019)

2.1.3 หมึกพิมพ์พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี เช่น พอลิพีนีลีน ไวนิลีน (polyphenylene vinylene; PPV) พอลิอะนิลีน (polyaniline; PANI) อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัตินำไฟฟ้า และนำมาใช้เป็นส่วนผสมในหมึกพิมพ์เพื่อให้มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ คือ พอลิเอทิลีนไดออกซีไทโอฟินและ พอลิสไตรีน ซัลโฟเนต (poly (3,4-ethylenedioxythiophene : polystyrene sulfonate; PEDOT:PSS) ที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น PEDOT และส่วนที่เป็น PSS โดย PSS ทำหน้าที่ยึดติดกับสารเคมีชนิดอื่น และ PEDOT ทำหน้าที่นำไฟฟ้า โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถละลายน้ำได้ดี มีสภาพนำไฟฟ้าดี สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้ โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ PEDOT:PSS แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างพอลิเมอร์ PEDOT:PSS

ที่มา: Seekaew และคณะ (2014, pp.2974)

เนื่องจากพอลิเมอร์ PEDOT:PSS มีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี ($10^{-3} - 4 \times 10^3 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$) มีความยืดหยุ่นสูง (>100 เปอร์เซ็นต์) มีความราบเรียบ (ค่าความหยาบน้อยกว่า 2 นาโนเมตร) สามารถโค้งงอได้ ($r = 1.0 \text{ mm}$) มีความเสถียรในอากาศ มีค่าฟังก์ชันงาน (work function) ที่ดี (4.8 eV – 5.4 eV) และมีความโปร่งแสง (มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร) ในช่วง พ.ศ. 2549 – พ.ศ. 2561 พอลิเมอร์ PEDOT:PSS ถูกนำมาวิจัยค้นคว้าศักยภาพด้านต่าง ๆ โดยมีผลงานตีพิมพ์ในรูปของวารสารวิชาการระดับนานาชาติ มากกว่า 10,000 เรื่อง และมีจำนวนการอ้างอิงมากกว่า 500 ครั้ง (Fan และคณะ, 2019)

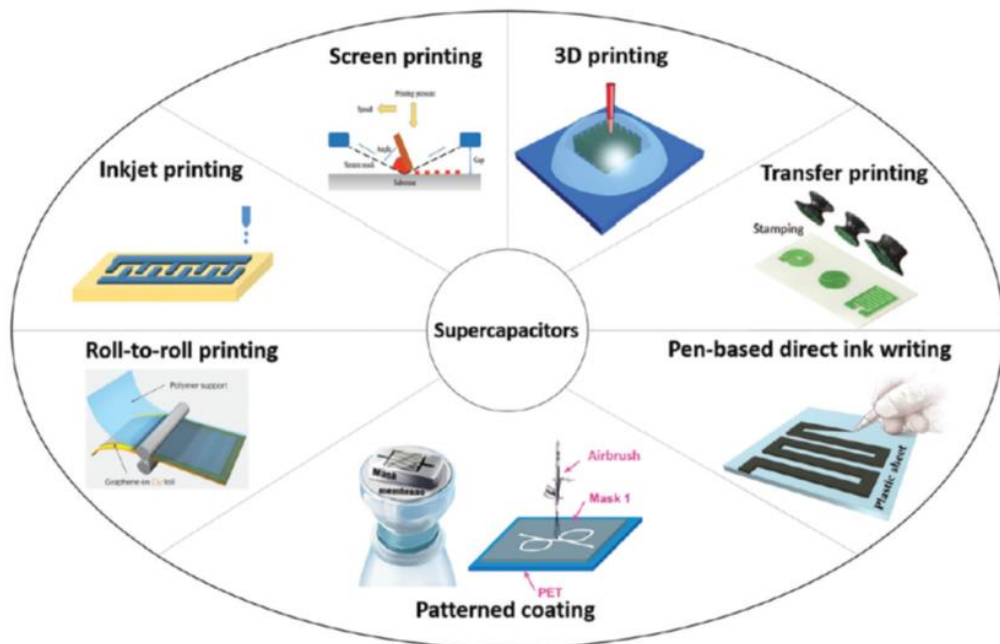
พอลิเมอร์ PEDOT:PSS สังเคราะห์ได้จากการผสมกันของมอนอเมอร์ (monomer) 2 ส่วน ได้แก่ PEDOT ที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี และเป็นชนิดบวก และ PSS มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นชนิดลบ หลังการผสมกันของมอนอเมอร์ PEDOT และ PSS ให้ได้เป็นพอลิเมอร์ PEDOT:PSS จึงมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) ซึ่งมีลักษณะเป็นสีน้ำเงินเข้ม เนื่องจากการมีสีโทนเข้ม แสดงว่ามีการพัฒนาเป็นหมึกพิมพ์ที่มีสมบัตินำไฟฟ้าที่ดี เมื่อนำไปใช้เป็นหมึกพิมพ์ในการพิมพ์แบบพ่นหมึก (Srichan และคณะ, 2009) และการพิมพ์สกรีน (Sinha และคณะ, 2017; Pali, Jindal, และ Garg, 2018) สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุ หรือ แบตเตอรี่ (Zhang และคณะ, 2018) และเซ็นเซอร์แก๊ส (Wongcoosuk และคณะ, 2012) โดยงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการนำพอลิเมอร์ PEDOT:PSS ไปประยุกต์ใช้งานด้านเซ็นเซอร์ โดยพบว่า PEDOT:PSS มีสมบัติในการตรวจจับแก๊สแอมโมเนียได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่า PEDOT มีสมบัติในการตรวจจับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (Dunst และคณะ, 2017) และแก๊สมีเทน (Khasim และคณะ, 2021) ได้ด้วย

2.2 วงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์

วงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ (printed electronic circuit) เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการพิมพ์ที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมกรพิมพ์มาใช้สร้างวงจรไฟฟ้า โดยใช้โมเลกุลอินทรีย์ เพื่อสร้างวงจรหรือเป็นฐานรองรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อันมีผลทำให้เกิดการประยุกต์ใช้งานได้เพิ่มเติมหรือรูปแบบใหม่ไปจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังช่วยให้การผลิตวงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มีต้นทุนลดลง ในปัจจุบันพบว่า มหาวิทยาลัยหลายแห่งมีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์แนวใหม่ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์จำนวนมาก สำหรับภาคอุตสาหกรรมนั้น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมกรพิมพ์ต่างให้ความสนใจและต้องการร่วมมือในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ ต้องอาศัยความรู้ในหลากหลาย

สาขาวิชา เช่น วัสดุศาสตร์ พอลิเมอร์ นาโนเทคโนโลยี วิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ควอนตัมฟิสิกส์ เทคโนโลยีการพิมพ์ วิศวกรรมพื้นผิว เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้การเกิดวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ จึงต้องอาศัยองค์ความรู้แบบบูรณาการกันในการสร้างงานวิจัยและต้นแบบวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ที่มีประสิทธิภาพ

วงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ สามารถเตรียมได้โดยการนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เหมาะสมพิมพ์ลงบนฐานรองรับที่ต้องการโดยใช้เทคนิคการพิมพ์แบบต่าง ๆ เช่น การเขียนหมึกพิมพ์โดยตรงโดยใช้ปากกา (Pen-based direct ink writing) การเคลือบแบบมีลวดลาย (Patterned coating) การพิมพ์แบบม้วนโรล (Roll to roll printing) การพิมพ์สกรีน (Screen printing) การพิมพ์สามมิติ (3 Dimensional printing) การพิมพ์แบบทรานเฟอร์ (Transfer printing) และการพิมพ์พ่นหมึก (Inkjet printing) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์สำหรับตัวเก็บประจุแบบยวดยิ่ง (Supercapacitor) แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การพิมพ์วงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบต่าง ๆ

ที่มา: Zhang และคณะ (2019)

สำหรับวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ การพัฒนาส่วนผสมในหมึกพิมพ์มีผลทำให้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีสมบัติที่โดดเด่น และแตกต่าง โดยทั่วไปหมึกพิมพ์ ประกอบด้วย สารสี ตัวทำละลาย เรซิน

และสารเติมแต่ง การปรับสัดส่วนขององค์ประกอบหมึกพิมพ์จะมีผลต่อความตึงผิว และความหนืดของหมึกพิมพ์ ซึ่งจะส่งผลต่อการพิจารณาวิธีการพิมพ์ด้วย

แผ่นรองรับ (substrate) หรือฐานรอง มีบทบาทที่สำคัญต่อวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ การเลือกแผ่นรองรับสามารถพิจารณาได้จากสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความยืดหยุ่นเชิงกล (mechanical flexibility) ความสามารถในการเปียกชื้น (wettability) ความหนา (thickness) ความเรียบของพื้นผิว (surface smoothness) ความหนาแน่น (density) ความต้านทานความร้อน (heat resistance) และความโปร่งใส (transparency) ยกตัวอย่างเช่น ความสามารถในการเปียกชื้น เป็นสมบัติของแผ่นรองรับที่ควรคำนึง เนื่องจากในกระบวนการพิมพ์ หมึกพิมพ์มีองค์ประกอบของน้ำหรือน้ำมันที่ติดบนแผ่นรองรับ ดังนั้น แผ่นรองรับจึงควรมีสมบัติด้านความสามารถในการเปียกชื้นได้ดี นอกจากนี้แผ่นรองรับที่มีสมบัติโปร่งใสไม่ดี ทำให้ส่งผ่านของเหลวในชั้นผิวหน้าได้ไม่ดี จะมีผลต่อการกระจายตัวของหมึกพิมพ์เมื่อผ่านกระบวนการพิมพ์แล้ว ดังนั้น กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นรองรับก่อนนำมาใช้พิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า จึงเป็นสิ่งจำเป็น ตัวอย่าง กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นรองรับ เช่น กระบวนการทางเคมี และความร้อน แต่เนื่องจากแผ่นรองรับบางประเภทมีความทนทานต่อสารเคมี หรือความร้อนได้ไม่ดี จึงมีการใช้กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้พลาสมา (plasma treatment) วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแผ่นรองรับในวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ ได้แก่ พอลิเมอร์ กระจก และผ้า เป็นต้น

นอกจากกระบวนการก่อนพิมพ์ในการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นรองรับแล้ว กระบวนการหลังพิมพ์เพื่อทำให้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้ายึดติดกับแผ่นรองรับได้ดีก็เป็นสิ่งจำเป็น ตัวอย่างกระบวนการดังกล่าวเช่น การเผาผนึก (sintering) การบ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet curing) และการอบอ่อน (anneal) สำหรับการเผาผนึกมีเทคนิคต่าง ๆ ที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ การเผาผนึกด้วยความร้อน สารเคมี แสง เลเซอร์ และคลื่นไมโครเวฟ นอกจากการเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้ากับแผ่นรองรับ พบว่า กระบวนการหลังพิมพ์ดังกล่าว ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้อีกด้วย

แผ่นรองรับที่นิยมนำมาใช้เป็นฐานรองของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า คือ พลาสติกพอลิเทอเรพทาเลต (polyethylene terephthalate: PET) โดย PET คือ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจึงมีความเหนียวสูง มีความใสแวววาวเป็นพิเศษ มีความปลอดภัยสูง แข็งแรงทนทาน ไม่เปราะแตกง่าย สามารถทนต่อความเป็นกรดและป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ เช่น ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี พลาสติกชนิดนี้เป็นที่นิยมในกลุ่มอุตสาหกรรมอาหาร ผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารต่าง ๆ และรวมถึงของใช้ในชีวิตประจำวันหลายชนิด เช่น ขวดบรรจุของเหลว เช่น เครื่องดื่ม น้ำดื่ม น้ำอัดลม น้ำผลไม้ และน้ำมัน แผ่นฟิล์มหรือแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เคลือบพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นพลาสติกที่สามารถรีไซเคิลได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถนำ

กลับมาหลอมทำบรรจุภัณฑ์ใหม่ได้ และยังสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นได้อีกด้วย เช่น เสื้อยืด เสื้อแจ็คเก็ต โยสังเคราะห์ พรดเซ็ดเท้า เป็นต้น

สมบัติที่น่าสนใจของพลาสติก PET ได้แก่ มีความโปร่งใส มีความเหนียวสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านการต้านแรงดึง และการต้านแรงกระแทก มีความทนทานต่อสารเคมีจำพวกกรด และตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี แต่ไม่ทนทานต่อเบส ดูดซึมน้ำได้ต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดีมาก ป้องกันการซึมผ่านของไขมัน/น้ำมันได้ดี สามารถเผาผนึกด้วยความร้อนได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 220 - 230 องศาเซลเซียส

2.3 สภาพนำไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้า

ความต้านทานไฟฟ้า (resistance; R) เป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่จำเป็นต้องพิจารณาเมื่อต้องการนำวัสดุนั้นมาใช้เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะทำให้การประเมินคุณภาพของวัสดุ มีความแม่นยำสูง และเป็นการวัดแบบไม่ทำลาย อย่างไรก็ตามเนื่องจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ เครื่องมือวัด และการติดตั้งเครื่องมือวัด ทำให้การวัดความต้านทานของวัสดุให้แม่นยำเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตาม ยังมีอีกค่าวัดที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity; ρ) ซึ่งไม่ขึ้นกับปัจจัยแวดล้อม แต่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ อีกทั้งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถนำไปหาค่าความต้านทานไฟฟ้าได้

การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ กรณีรูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีภาคตัดขวาง (cross section) มีค่าเป็น A มีความยาวเป็น l สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1)

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

สำหรับค่าสภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; σ) สามารถคำนวณได้จากปฏิภาคส่วนกลับของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (2.2) หน่วยของค่าสภาพการนำไฟฟ้า คือ $(\Omega \cdot m)^{-1}$ หรือ เรียกว่า ซีเมนส์ (Siemens; S)

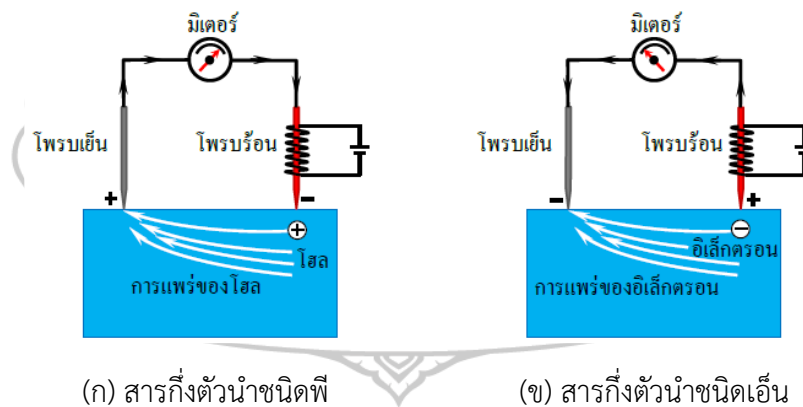
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

ความต้านทานไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับแรงดันและกระแสไฟฟ้าของวัตถุ วัตถุที่มีความต้านทานต่ำจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ง่าย เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า ในขณะที่ฉนวนไฟฟ้ามีความต้านทานสูงมาก จะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยาก แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

กระแสไฟฟ้า I มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A) และความต้านทาน (R) มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω) สอดคล้องกับกฎของโอห์ม (Ohm's law) แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.3)$$

ในกรณีสารกึ่งตัวนำ การตรวจสอบชนิดของพาหะข้างมาก จะทำให้ทราบชนิดของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ ถ้าพาหะข้างมาก คือ โฮล (Hole) สารนั้นจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) และถ้าพาหะข้างมาก คือ อิเล็กตรอน สารนั้นจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) วิธีการตรวจสอบพาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการวัด สามารถทำได้โดยวิธีการวัดด้วยโพรบร้อน (Hot-Point probe measurement) ตรวจสอบโดยใช้ขั้วไฟฟ้า 2 โพรบ ขณะวัดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง เรียกว่า โพรบเย็น (cold probe) อีกโพรบหนึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เรียกว่า โพรบร้อน (hot probe) และโพรบนี้จะถูกเพิ่มอุณหภูมิ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบโพรบ เมื่อกดโพรบลงบนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ แล้วสังเกตการเบนของเข็มมิเตอร์ ทิศทางการเบนของเข็มจะสามารถระบุชนิดของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำนั้นได้ โดยถ้าทิศทางของเข็มเบนเข้าหาโพรบร้อน แสดงว่าสารนั้น คือ สารกึ่งตัวนำชนิดพี แต่ถ้าทิศทางของเข็มเบนเข้าหาโพรบเย็น แสดงว่า สารนั้น คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แสดงดังภาพที่ 2.3

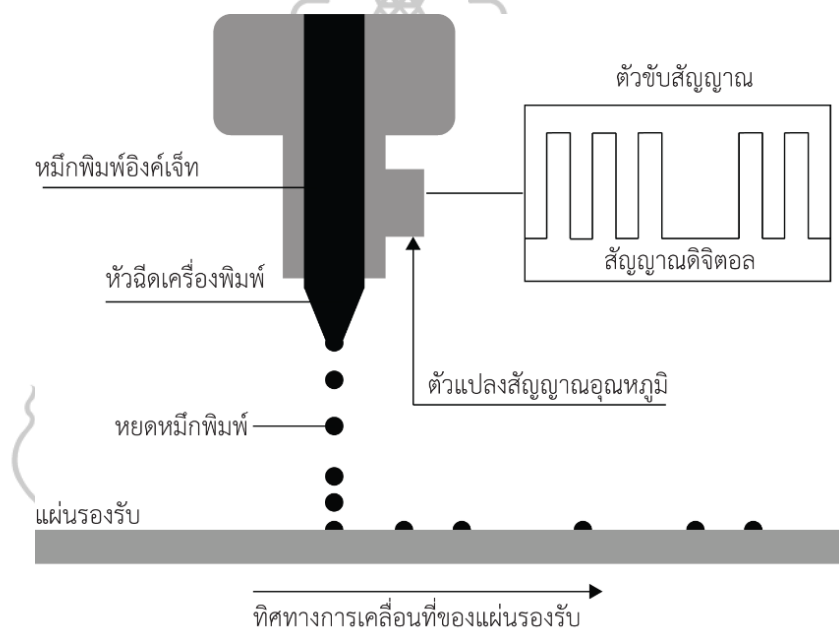


ภาพที่ 2.3 การแพร่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำ

ที่มา: ณรงค์ สัจวารณที (2562, น.93)

2.4 การพิมพ์พ่นหมึก

การพิมพ์พ่นหมึก (inkjet printing) เป็นวิธีพิมพ์ที่ใช้การพ่นหยดหมึกเหลวออกจากท่อพ่นหมึกแล้วไปสร้างเป็นภาพโดยตรงบนวัสดุใช้พิมพ์ โดยไม่ต้องมีตัวกลางในการถ่ายโอนภาพ แต่จะต้องมีระบบควบคุมหยดหมึกที่สร้างขึ้นให้ไปพิมพ์เฉพาะบริเวณภาพที่ต้องการเท่านั้น และมีกลไกที่ทำให้ส่วนที่ไม่ใช่ภาพไม่มีหยดหมึกพ่นไปเกาะติดบนวัสดุใช้พิมพ์ โดยอาจหยุดหยดหมึกก่อนที่จะมาถึงวัสดุใช้พิมพ์ หรือไม่มีการสร้างหยดหมึกออกจากท่อพ่นหมึกตั้งแต่แรก วิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึกลักษณะนี้ หัวพิมพ์ไม่ได้สัมผัสกับวัสดุใช้พิมพ์ และไม่ต้องใช้แรงกดพิมพ์ในการทำให้หมึกพิมพ์ยึดติดบนวัสดุใช้พิมพ์ที่มีผิวราบระหว่างการถ่ายโอนภาพ และยังทำให้สามารถพิมพ์บนวัสดุใช้พิมพ์ในรูปทรงต่างๆ ได้หลากหลายมากขึ้น แผนภาพกระบวนการพิมพ์แบบพ่นหมึก แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แผนภาพกระบวนการพิมพ์แบบพ่นหมึก

ขั้นตอนกระบวนการพิมพ์พ่นหมึก ประกอบด้วย การสร้างหยดหมึกออกจากท่อพ่นหมึก และการควบคุมหยดหมึกเพื่อสร้างภาพบนวัสดุใช้พิมพ์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.4.1 การสร้างหยดหมึกออกจากท่อพ่นหมึก

เป็นหลักการสำคัญและจำเป็นสำหรับการพิมพ์ระบบพ่นหมึก ได้มีการพัฒนาวิธีต่าง ๆ ขึ้น เพื่อสร้างและพ่นหยดหมึกออกจากส่วนปลายท่อพ่นหมึก และการสร้างหยดหมึกให้พ่น

นอกจากท่อพ่นหมึกอาจเป็นการพ่นแบบต่อเนื่อง หรือพ่นแบบเฉพาะจุดที่ต้องการก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเครื่องคอมพิวเตอร์และวัตถุประสงค์การใช้งาน

2.4.2 การควบคุมหยดหมึกเพื่อสร้างภาพบนวัสดุใช้พิมพ์

เป็นหลักการพ่นหยดหมึกให้เป็นภาพมี 2 วิธี ตามประเภทของการพิมพ์พ่นหมึก คือ การพิมพ์พ่นหมึกแบบต่อเนื่อง และการพิมพ์พ่นหมึกแบบเฉพาะจุดที่ต้องการ

2.4.2.1 การพิมพ์พ่นหมึกแบบต่อเนื่อง เป็นการพิมพ์ระบบพ่นหมึกที่ใช้แรงดันให้หมึกพ่นออกมาจากท่อพ่นหมึกขนาดเล็กที่ละหยดอย่างต่อเนื่องเป็นสายหมึก การพิมพ์พ่นหมึกประเภทนี้จำเป็นต้องมีระบบสร้างประจุเพื่อสร้างประจุไฟฟ้าแก่หยดหมึกตามสัญญาณข้อมูลภาพ โดยให้หยดหมึกส่วนที่เป็นภาพมีประจุไฟฟ้าแตกต่างจากหยดหมึกที่ไม่ต้องการให้เป็นภาพ และมีระบบควบคุมทิศทางหยดหมึกให้ตรงไปยังวัสดุใช้พิมพ์เฉพาะหยดที่ต้องการให้สร้างเป็นภาพ ส่วนหยดหมึกที่ไม่ต้องการให้ไปตกบนวัสดุใช้พิมพ์ ระบบควบคุมหยดหมึกก็จะต้องเบนทิศทางให้ไปตกที่ส่วนกักหมึกให้ไหลกลับลงไปอ่างหมึก แล้วหมุนเวียนกลับเข้าไปในท่อพ่นหมึกใหม่

2.4.2.2 การพิมพ์พ่นหมึกแบบเฉพาะจุดที่ต้องการ เป็นการพิมพ์ระบบพ่นหมึกที่มีท่อพ่นหมึกออกมาตามข้อมูลสัญญาณภาพเฉพาะหยดหมึกที่ต้องการให้ปรากฏบนวัสดุใช้พิมพ์ ส่วนบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีหยดหมึกบนวัสดุใช้พิมพ์ก็จะเป็นการไม่มีการสร้างหยดหมึกออกมาจากท่อพ่นหมึกเลย การควบคุมให้มีการพ่นหรือไม่พ่นหมึกออกมาจากท่อพ่นหมึกขึ้นกับข้อมูลสัญญาณภาพซึ่งเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

สำหรับการควบคุมกลไกการสร้างภาพต่อเนื่องเต็มพื้นที่ภาพ เครื่องพิมพ์จะพ่นหมึกจากหัวพิมพ์จนเครื่องพิมพ์สามารถสร้างภาพได้ต่อเนื่องจนได้ภาพที่ต้องการบนวัสดุใช้พิมพ์ เนื่องจากหยดหมึกที่พ่นจากหัวพิมพ์ อันประกอบด้วยท่อพ่นหมึกหลายท่อในแต่ละคราวจะครอบคลุมพื้นที่พิมพ์บนวัสดุใช้พิมพ์ตามขนาดของหัวพิมพ์เท่านั้น จึงจำเป็นต้องมีกลไกการเคลื่อนที่หัวพิมพ์และการเคลื่อนที่วัสดุใช้พิมพ์ เพื่อสร้างภาพพิมพ์ให้ต่อเนื่องเต็มพื้นที่ภาพที่สามารถสร้างได้ โดยที่สามารถกำหนดความเร็วการพิมพ์ที่ต้องการ โครงสร้างของหัวพิมพ์ที่ทำให้ท่อพ่นหมึกมีขนาดเล็กและติดอยู่กัน จะเป็นตัวกำหนดความละเอียดการพิมพ์ที่เครื่องพิมพ์สามารถพิมพ์ได้ และกลไกการเคลื่อนที่ของหัวพิมพ์ และวัสดุใช้พิมพ์เป็นตัวกำหนดความเร็วในการสร้างภาพบนวัสดุใช้พิมพ์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องพิมพ์พ่นหมึกแบบพ่นหมึกพิมพ์เฉพาะจุดที่ต้องการเพื่อพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าบนแผ่นพลาสติก PET

อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของการนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าไปใช้ในระบบเครื่องพิมพ์แบบพ่น คือ การอุดตันของหัวพ่นหมึก ดังนั้น คุณลักษณะของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องพิมพ์พ่นหมึกควรมีค่าความหนืดต่ำ เพื่อให้หมึกพิมพ์ไหลผ่านหัวพ่นได้ดี การประเมินความสามารถในการ

พิมพ์ของหมึกพิมพ์สามารถใช้ตัวเลขโอเนสจอร์จ (Ohnesorge number; Z) ความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$Z = \frac{(\alpha\rho\gamma)^{1/2}}{\eta} \quad (2.4)$$

โดยที่ α คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดหัวพิมพ์ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของหมึกพิมพ์ γ คือ ค่าความตึงผิวของหมึกพิมพ์ และ η คือ ค่าความหนืดของหมึกพิมพ์ จากรายงานการวิจัย พบว่า ค่าตัวเลขโอเนสจอร์จของหมึกพิมพ์ อยู่ในช่วง 4 ถึง 14 จะมีผลทำให้ได้งานพิมพ์ที่มีคุณภาพ (Jang และคณะ, 2009)

2.5 การออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์ คือ สิ่งที่ห่อหุ้มหรือบรรจุรวมทั้งภาชนะที่ใช้เพื่อขนส่งผลิตภัณฑ์จากแหล่งผู้ผลิตไปแหล่งผู้บริโภคหรือแหล่งใช้ประโยชน์เพื่อวัตถุประสงค์เบื้องต้นในการป้องกันและรักษาผลิตภัณฑ์ให้คงสภาพ ตลอดจนคุณภาพให้ใกล้เคียงกับเมื่อแรกผลิตมากที่สุด บรรจุภัณฑ์จึงนับเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการทางการตลาด โดยเฉพาะปัจจุบันการผลิตสินค้าหรือบริการได้ให้ความสำคัญกับผู้บริโภค บรรจุภัณฑ์เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการทางการตลาดโดยเฉพาะปัจจุบันที่การผลิตสินค้าหรือบริการได้ให้ความสำคัญกับผู้บริโภค จะได้เห็นว่าบรรจุภัณฑ์มีบทบาทมากขึ้น เพราะลำพังตัวสินค้าอาจไม่มีนวัตกรรม (innovation) หรือการพัฒนาอะไรใหม่ เพราะได้มีการวิจัยพัฒนากันมานานจนถึงขั้นสุดยอดแล้วจึงต้องมาเน้นกันที่บรรจุภัณฑ์ (package) กับการบรรจุหีบห่อ (packaging)

จากความหมายดังกล่าวพอสรุปได้ว่า บรรจุภัณฑ์หมายถึง วิทยาศาสตร์ ศิลปะและเทคโนโลยี ของการเตรียมสินค้าสำหรับการขนส่งและการขาย การสร้างความแน่ใจว่าสินค้าจะถูกส่งถึงมือผู้บริโภคคนสุดท้ายอย่างปลอดภัยในสภาพที่สมบูรณ์ด้วยต้นทุนต่ำสุด และเป็นระบบที่ประสานร่วมกันระหว่างการผลิตสินค้าสำหรับการขนส่ง การกระจาย การเก็บรักษา การขายปลีก และการใช้งานขั้นสุดท้าย การออกแบบบรรจุภัณฑ์จะหมายถึงการแก้ไขปัญหาการบรรจุ การป้องกัน การอำนวยความสะดวก และการสื่อสารความหมายแก่ผู้บริโภค (อรณิศ ปันยารชุน, 2558)

การบรรจุสินค้าโดยใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย และไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับสิ่งแวดล้อม ขณะที่บรรจุภัณฑ์นั้นจะต้องปกป้องตัวสินค้าให้อยู่ในสภาพที่ดีจากแหล่งผลิตจนถึงมือผู้บริโภค โดยไม่ได้รับความเสียหาย ทั้งนี้บรรจุภัณฑ์นั้น ๆ จะต้องมีต้นทุนของการผลิตที่ไม่สูงจนเกินไป รูปแบบและวัสดุบรรจุภัณฑ์ นอกจากทำหน้าที่ปกป้องคุ้มครองหรือห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ภายในให้ปลอดภัย

สะดวกต่อการขนส่ง ขณะเดียวกันต้องสวยงาม ดึงดูดใจความสนใจของผู้บริโภค ที่เอื้ออำนวยให้เกิดผลประโยชน์ในทางการค้า และการบริโภคด้วย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ที่มีส่วนประกอบวงจรรนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยใช้บรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษในการพัฒนาต้นแบบบรรจุภัณฑ์ ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ ประเภทของการออกแบบบรรจุภัณฑ์ แนวทางการออกแบบบรรจุภัณฑ์ การออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ และการออกแบบบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ

2.5.1 ประเภทของการออกแบบบรรจุภัณฑ์

การออกแบบบรรจุภัณฑ์ซึ่งจะช่วยทำให้บรรจุภัณฑ์สามารถทำหน้าที่ปกป้องคุ้มครองสินค้าที่บรรจุระหว่างการขนส่งจากผู้ผลิตถึงผู้บริโภค อีกทั้งต้องส่งเสริมการขาย โดยมีความสวยงาม ดึงดูดความสนใจผู้บริโภคให้ซื้อสินค้ามาบริโภค ดังนั้น การออกแบบบรรจุภัณฑ์จึงสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ได้แก่ การออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ และการออกแบบกราฟิกบรรจุภัณฑ์ (อรณิศ ปันยารชุน, 2558)

2.5.1.1. การออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ เป็นการเริ่มต้นออกแบบบรรจุภัณฑ์โดยเน้นรูปทรง 3 มิติ โครงสร้างและขนาด วัสดุที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ และการผลิตบรรจุภัณฑ์ ซึ่งการออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์เน้นหน้าที่ป้องกันและรักษาคุณภาพสินค้าเป็นประเด็นหลัก ความเสียหายของสินค้าเกิดขึ้นในระหว่างการขนส่งและการจัดเก็บ ส่วนใหญ่เป็นความเสียหายเชิงกลจากการตกหล่น การกดทับ การกระแทก ความเสียหายจากสภาพภูมิอากาศ และความเสียหายทางชีวภาพ นอกจากนี้โครงสร้างบรรจุภัณฑ์ยังควรอำนวยความสะดวกต่อผู้บริโภคในการเปิดแกะและการใช้งานด้วย

2.5.1.2 การออกแบบกราฟิกบรรจุภัณฑ์ เป็นการออกแบบหลังจากได้โครงสร้างบรรจุภัณฑ์แล้ว โดยเน้นการสื่อความหมายที่สะท้อนตัวตนของเส้น สร้างความเข้าใจในตัวสินค้าโดยให้ข้อมูลสินค้า เพื่อโน้มน้าวผู้บริโภคตัดสินใจซื้อสินค้า รวมถึงการสร้างการจดจำในสินค้านั้น ๆ ให้แก่ผู้บริโภคกลับมาซื้อสินค้านั้นอีก โดยเน้นการใช้ภาพ ตัวอักษร ตราสินค้า และสีอื่นต่าง ๆ บนบรรจุภัณฑ์เพื่อนำเสนอแนวคิดเชิงสร้างสรรค์ และสุนทรียะบนบรรจุภัณฑ์

2.5.2 แนวทางการออกแบบบรรจุภัณฑ์

อรณิศ ปันยารชุน (2558: 8-6) ได้กล่าวถึงแนวทางการออกแบบบรรจุภัณฑ์ แบ่งได้เป็น 2 แนวทางตามลักษณะการใช้งานที่ต้องการเน้น ดังนี้

2.5.2.1 การออกแบบที่เน้นผลิตภัณฑ์เป็นศูนย์กลาง โดยต้องศึกษาบริบทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ซึ่งมักเกิดจากสภาพแวดล้อมที่ผลิตภัณฑ์นั้นต้องเผชิญ นับตั้งแต่เริ่มบรรจุ จัดส่งไปยังสถานที่จัดจำหน่าย

หรือเก็บรักษาในคลังสินค้า บนชั้นวางสินค้า และเก็บรักษาเมื่อถึงมือผู้บริโภค สภาพแวดล้อมดังกล่าว จำแนกเป็น 3 ด้านหลัก ๆ คือ ด้านกายภาพ ด้านภูมิอากาศ ด้านชีวภาพ โดยบรรจุภัณฑ์จะต้อง แข็งแรงเมื่อเผชิญต่อแรงกระทำ อาทิ แรงกระทำจากการซ้อนกันเอง แรงกระทำจากการชูดัดกัน ระหว่างสินค้ากับบรรจุภัณฑ์ แรงสั่นสะเทือนของยานพาหนะ อีกทั้งต้องทนทานต่อสภาพแวดล้อม ทางภูมิอากาศ อาทิ ความชื้น ไอน้ำ แสงแดด ความร้อน และปลอดภัยจากอันตรายทางชีวภาพ อาทิ เชื้อรา จุลินทรีย์

2.5.2.2 การออกแบบที่เน้นมนุษย์เป็นศูนย์กลาง โดยมุ่งเน้นการปฏิสัมพันธ์ ระหว่างมนุษย์และผลิตภัณฑ์ หรือบรรจุภัณฑ์ ที่คนคิดและพฤติกรรมผู้ใช้ทำให้เกิดความต้องการบรรจุ ภัณฑ์ที่แตกต่างกันไป ซึ่งมีวัตถุประสงค์สำคัญ 2 ประเด็น คือ ณ จุดจำหน่าย และขณะใช้งาน โดยการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อประโยชน์ ณ จุดจำหน่าย จะออกแบบให้ดึงดูดใจผู้ซื้อและสร้างการจดจำ โดยสื่อความหมายของสินค้าให้ผู้บริโภคทราบ และถ่ายทอดอัตลักษณ์ของตราสินค้านั้น ส่วนการ ออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อเอื้อต่อการใช้งาน เช่น อำนวยความสะดวกในการใช้สอย และเข้าใจวิธีการใช้ งานอย่างถ่องแท้

2.5.3 การออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์

เป็นการกำหนดลักษณะรูปร่าง รูปทรง ขนาด ปริมาตรของวัสดุที่จะนำมาผลิต และประกอบเป็นภาชนะบรรจุให้เหมาะสมกับหน้าที่ใช้สอย ตลอดจนกรรมวิธีการผลิต การบรรจุ การเก็บรักษาและการขนส่ง โครงสร้างของบรรจุภัณฑ์มีรูปร่างลักษณะอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องศึกษาข้อมูลของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องบรรจุ และแบบโครงสร้าง เพื่อรองรับการบรรจุให้เหมาะสม รูปทรงที่เหมาะสมแก่การจับ ถือ หิ้ว และอำนวยความสะดวกในการนำเอาผลิตภัณฑ์ออกมาใช้งาน ขณะเดียวกันต้องทำหน้าที่ปกป้องผลิตภัณฑ์โดยตรง และเสริมสร้างภาพพจน์ ความพอใจใน ผลิตภัณฑ์ให้แก่ผู้ใช้ และความน่าเชื่อถือให้แก่ผู้ผลิต

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าในขั้นตอนการกำหนดการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับ ผลิตภัณฑ์ ผู้ออกแบบจะต้องอาศัยความรู้ และข้อมูลตลอดจนปัจจัยต่าง ๆ มาพิจารณาตัดสินใจร่วมใน กระบวนการออกแบบ เช่น ราคาวัสดุ การผลิต การขนส่งตลาด การพิมพ์ ที่จะต้องพิจารณาว่ามีความ คุ่มทุน หรือเป็นไปได้ในระบบการผลิตและจำหน่ายเพียงใด แล้วจึงมากำหนดรูปร่างรูปทรงของบรรจุ ภัณฑ์ว่าควรมีรูปลักษณะอย่างไร ซึ่งรูปทรงเรขาคณิต รูปทางอิสระ มีข้อดีข้อเสีย ในการบรรจุ การใช้ เนื้อที่ และมีความเหมาะสมกับประเภทของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไป วัสดุแต่ละชนิดก็มีข้อจำกัด และสามารถดัดแปลงประโยชน์ได้เพียงใด หรือใช้วัสดุใดมาประกอบ จึงจะเหมาะสม หรือลดต้นทุนใน การผลิตได้ดีที่สุด เหล่านี้คือสิ่งที่ผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาประกอบด้วย

ดังนั้น จึงเห็นได้ว่าในขั้นตอนของการออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ นักออกแบบ เริ่มตั้งแต่การสร้างแบบด้วยการร่างแบบแนวความคิดของรูปร่างบรรจุภัณฑ์ และสร้างภาพประกอบ

รายละเอียดด้วยการเขียนแบบ แสดงรายละเอียดมาตราส่วนที่กำหนดแน่นอน เพื่อแสดงให้เห็นผู้ผลิตหรือผู้เกี่ยวข้องเข้าใจ อ่านแบบได้ การใช้ทักษะทางศิลปะในการออกแบบก็คือ เครื่องมือที่ออกแบบเพื่อการนำเสนอต่อเจ้าของงานหรือผู้ว่าจ้าง ตลอดจนผู้เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ผลงานที่สำเร็จออกมา มีประสิทธิภาพในการใช้งานจริง

ลำดับขั้นตอนของการดำเนินงานออกแบบโครงสร้างของบรรจุภัณฑ์นับตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดให้ได้ผลงานออกมา มีดังต่อไปนี้

1) กำหนดนโยบายหรือวางแผนยุทธศาสตร์ เช่น วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของการผลิตเงินทุน งบประมาณการจัดการ และการกำหนดสถานะของบรรจุภัณฑ์

2) การศึกษาและการวิจัยเบื้องต้น ได้แก่ การศึกษาข้อมูลหลักการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และวิศวกรรมทางการผลิต ตลอดจนการค้นพบสิ่งใหม่ ๆ ที่เกิดขึ้น และเกี่ยวข้องสอดคล้องกันกับการออกแบบโครงสร้างของบรรจุภัณฑ์

3) การศึกษาถึงความเป็นไปได้ของบรรจุภัณฑ์ ด้วยการร่างแบบ (sketch) แสดงถึงรูปร่างลักษณะ และส่วนประกอบของโครงสร้าง 2 มิติ หรืออาจใช้วิธีการอื่น ๆ การขึ้นรูปลักษณะ 3 มิติ ก็สามารถกระทำได้ในขั้นตอนนี้ จึงเป็นการเสนอแนวความคิดสร้างสรรค์ขั้นต้นได้หลากหลายแบบ เพื่อศึกษาการนำไปใช้ในเทคนิควิธีการบรรจุ และการคำนวณเบื้องต้น ตลอดจนงบประมาณดำเนินการและเพื่อการพิจารณาคัดเลือกแบบร่างไว้เพื่อพัฒนาให้สมบูรณ์ในขั้นตอนต่อไป

4) การพัฒนาและแก้ไขแบบ ในขั้นตอนนี้ผู้ออกแบบจะต้องขยายรายละเอียดปลีกย่อยต่าง ๆ ของแบบร่าง โดยเตรียมเอกสาร หาข้อมูลประกอบ มีการกำหนดเทคนิคและวิธีการผลิต การบรรจุ วัสดุ การประมาณราคา ตลอดจนการทดสอบทดลองบรรจุเพื่อหารูปร่างรูปทรงหรือส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับหน้าที่ของบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการ ด้วยการสร้างรูปจำลองง่าย ๆ เพื่อการนำเสนอต่อลูกค้า

5) การพัฒนาต้นแบบจริง เมื่อแบบโครงสร้างได้รับการแก้ไขและพัฒนาผ่านการยอมรับแล้ว ลำดับต่อมาต้องดำเนินการเขียนแบบ เพื่อกำหนดขนาดรูปร่างและสัดส่วนจริงด้วยการเขียนภาพประกอบ แสดงรายละเอียดของรูปแบบด้านต่าง ๆ ภาพแสดงการประกอบของส่วนประกอบต่าง ๆ การกำหนดมาตราส่วน บอกรูปร่าง และประเภทวัสดุที่ใช้ ความเข้าใจกันได้ในกระบวนการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ของจริง ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องสร้างต้นแบบบรรจุภัณฑ์ที่จำลองขึ้นมาก่อนเพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง และแยกแยะส่วนประกอบต่าง ๆ ในการศึกษา โดยสร้างด้วยวัสดุที่มีลักษณะ และรายละเอียดใกล้เคียงกับบรรจุภัณฑ์ของจริงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ อาทิ ปูนพลาสเตอร์ ดินเหนียว กระดาษ

6) การผลิตจริง ส่วนใหญ่เป็นหน้าที่รับผิดชอบของฝ่ายผลิตในโรงงานที่จะต้องดำเนินการตามแบบที่นักออกแบบออกแบบไว้ ซึ่งฝ่ายผลิตจะต้องจัดเตรียมแบบแม่พิมพ์ของบรรจุภัณฑ์ ให้เป็นไปตามกำหนด และผลิตตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ออกมาจำนวนหนึ่งเพื่อนำไปทดสอบ

2.5.4 การออกแบบบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ

บรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษเป็นบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้กันมากสำหรับบรรจุสินค้าที่ต้องการจำหน่ายในร้านค้าปลีก และร้านค้าส่ง เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ให้คุ้มครองผลิตภัณฑ์ได้ดี สามารถทำเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้หลากหลาย และออกแบบให้น่าสนใจ พิมพ์ได้สวยงาม ใช้เป็นสื่อการขายและนำเสนอข้อมูลผลิตภัณฑ์ได้ดี

กล่องกระดาษแข็งจำแนกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ กล่องพับได้ (folding carton) และกล่องคงรูป (set up box) (มานิตย์ กมลสุวรรณ และผกาภาศ ผจญเกล้า, 2558)

1) *กล่องพับได้* เป็นกล่องที่ทำจากกระดาษแข็งที่มีสมบัติโค้งงอได้ การขนส่งกล่องพับได้จากโรงงานผลิตกล่องไปยังโรงงานบรรจุสินค้าสามารถส่งในรูปพับแบนราบ เมื่อนำไปบรรจุสินค้า จึงนำไปขึ้นรูปทรงเป็นกล่อง บรรจุ และปิดผนึกกล่อง ทำให้มีข้อดีตรงที่สะดวกในการใช้งาน และการกระจายสินค้า ประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บและขนส่งก่อนใช้งาน

2) *กล่องคงรูป* เป็นกล่องกระดาษแข็งที่ประกอบขึ้นรูปเป็นกล่องสำเร็จพร้อมใช้งาน ไม่สามารถพับแบนราบได้ มักใช้ใส่สินค้าที่มีน้ำหนักมาก เปรียบเทียบ หรือมีราคาแพง จึงต้องการกล่องคงรูปที่มีโครงสร้างแข็งแรง โดยมักทำจากกระดาษแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่า 1,000 ไมครอน หรือมีน้ำหนักพื้นฐานมากกว่า 400 กรัม/ตารางเมตร และหุ้มด้วยวัสดุหุ้มเพื่อความสวยงาม เช่น กระดาษแลคซัน กระดาษพิมพ์ลาย ผ้า หนัง เป็นต้น กล่องคงรูปสามารถออกแบบให้มีรูปทรงต่างได้หลากหลาย เช่น กล่องฝาแยกจากตัวกล่อง (lift-off-lid, LOL) กล่องฝาเลื่อน (shell and slide) เป็นต้น มักเป็นการผลิตด้วยมือ และใช้ทักษะความชำนาญของผู้ผลิตอย่างมาก

โดยทั่วไปนิยมใช้บรรจุภัณฑ์กล่องพับได้ใน การบรรจุสินค้าในเชิงอุตสาหกรรมมากกว่ากล่องคงรูป เนื่องจากมีเครื่องจักรการผลิตและแปรรูปที่ผลิตได้จำนวนมากและรวดเร็ว ประหยัดพื้นที่การขนส่งกล่องก่อนใช้งาน และมีรูปแบบที่หลากหลาย งานวิจัยนี้ศึกษาบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าซึ่งส่วนใหญ่ใช้กล่องกระดาษพับได้ จึงจะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปและโครงสร้างบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษพับได้ต่อไป

2.5.4.1 ลักษณะทั่วไปของบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ บรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ทำจากวัสดุเยื่อกระดาษเป็นหลัก ซึ่งอาจเป็นเยื่อบริสุทธิ์หรือเยื่อรีไซเคิลก็ได้ ซึ่งมีสมบัติและคุณภาพแตกต่างกันตามการนำไปใช้งาน เช่น น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา ความเหนียว และลักษณะผิวกระดาษ ทั้งนี้อาจมีส่วนประกอบที่ทำจากวัสดุอื่น ๆ เช่น พลาสติก ฟอยล์

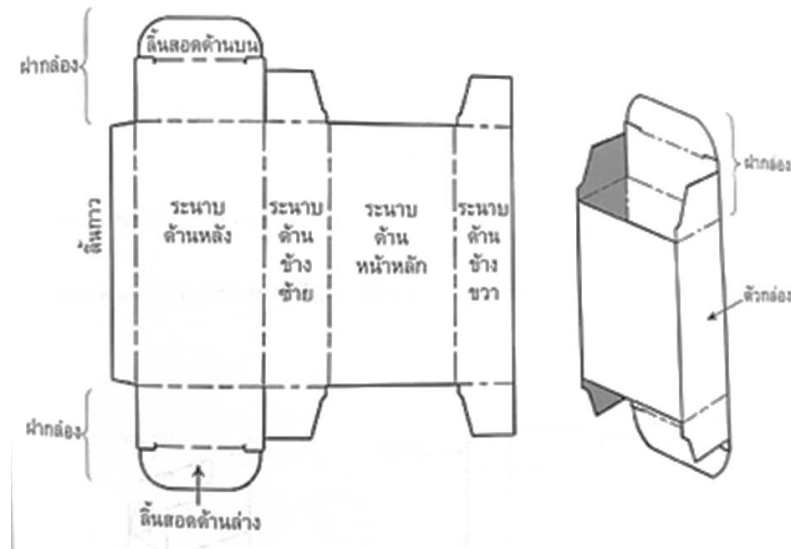
อะลูมิเนียม หรือมีการเคลือบผิว หรือลามิเนตพลาสติกเพื่อเสริมศักยภาพการใช้งาน และป้องกันความเสียหายของสินค้าที่อาจเกิดขึ้นจากการขนส่งได้ดียิ่งขึ้น

การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กล่องกระดาษ ต้องการสมบัติที่เกี่ยวข้อง 2 ด้าน คือ สมบัติเกี่ยวกับการพิมพ์และการแปรรูปเป็นรูปทรงบรรจุภัณฑ์ และสมบัติเกี่ยวกับสมรรถนะการใช้งานบรรจุภัณฑ์

1) สมบัติที่เกี่ยวข้องกับการพิมพ์และการแปรรูปเป็นรูปทรงบรรจุภัณฑ์ เพื่อสร้างภาพลักษณ์สินค้าและแสดงข้อมูลของสินค้าต่อผู้บริโภคให้กระตุ้นความต้องการซื้อ โดยมีการแปรรูปเป็นรูปทรงที่เหมาะสมต่อการนำไปบรรจุสินค้า การกระจายสินค้า และการจัดเก็บ สมบัติของกระดาษที่ต้องพิจารณา เช่น สี ความมันวาว สภาพพิมพ์ได้ (printability) ความเรียบและความแข็งแรงของผิวหน้ากระดาษ ความสามารถในการรับหมึกพิมพ์ ความสามารถในการพับรอย (crease ability) และพับได้ (foldability) เป็นต้น

2) สมบัติเกี่ยวกับสมรรถนะการใช้งานบรรจุภัณฑ์ จำเป็นต้องแข็งแรง เพื่อให้สามารถคุ้มครองสินค้าที่บรรจุอยู่ภายในได้ดี ตั้งแต่การบรรจุ การกระจายสินค้า การจัดเก็บจนถึงการใช้งาน สมบัติกระดาษที่ต้องการ เช่น ความหนา ความต้านแรงดึงหรือความทนแรงดึง (tensile strength) ความต้านแรงฉีกขาด (tearing strength) ความต้านแรงดันทะลุ (burst resistance) ความแข็งดึงหรือความคงรูป (stiffness) ความแข็งแรงต่อการกดทับ (compression strength) เป็นต้น

2.5.4.2 โครงสร้างบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ โดยปกติโครงสร้างกล่องกระดาษพับได้จะออกแบบในลักษณะแนวราบ หรือเรียกว่า แผ่นคลี่ โดยแบ่งเป็นส่วน ๆ ได้แก่ ส่วนลำตัวกล่อง และส่วนฝากล่อง โดยลำตัวกล่องแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ระบายด้านหน้า (principal display panel, PDP) ระบายด้านข้างขวา ระบายด้านข้างซ้าย และระบายด้านหลัง โดยมีลื่นทากาวที่ให้ประกบกันเป็นทรงสี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 2.5 โดยทั่วไปไม่นิยมให้ระบายด้านหน้าติดกับลื่นทากาว ส่วนฝากล่องมีทั้งแบบฝาสอด หรือฝาทากาว (สุภาวดี ธีรธรรมากร, 2558, น.9-5)

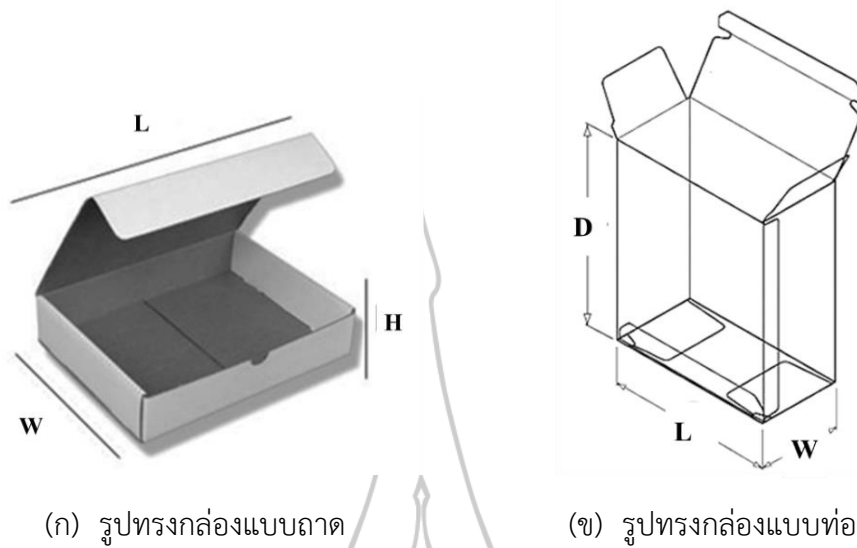


ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบต่าง ๆ บนโครงสร้างบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ

ที่มา: สุภาวดี ธีรธรรมากร (2558, น.9-5)

การออกแบบบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษโดยเฉพาะกล่องกระดาษพับได้ จำเป็นต้องมีการออกแบบลักษณะรูปทรง การยึดติดเป็นตัวกล่อง และรูปแบบฝาปิด เพื่อให้ได้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับสินค้าที่บรรจุ ทั้งนี้ มานิตย์ กมลสุวรรณ และพกามาศ พงษ์แก้ว (2558) ได้กล่าวถึงโครงสร้างบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

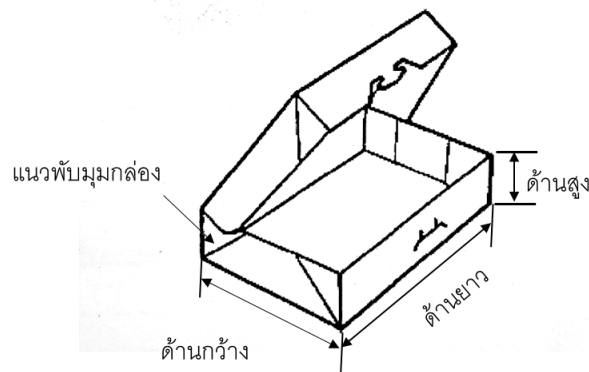
1) ลักษณะรูปทรง กล่องกระดาษพับได้ที่ใช้งานทั่วไปมีรูปทรง 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบถาด (tray) และแบบท่อ (tube) รูปทรงกล่องแบบถาด (ภาพที่ 2.6 (ก)) มีความลึกน้อยกว่าด้านกว้างและด้านยาว โดยพื้นที่หน้าตัดของฝากล่องสำหรับใส่หรือเอาสินค้าออกจากกล่องจะกว้างกว่ามิติด้านอื่น ๆ ขณะที่รูปทรงกล่องแบบท่อ (ภาพที่ 2.6 (ข)) มีความลึกมากกว่าด้านกว้างและยาว พื้นที่หน้าตัดของฝากล่องสำหรับใส่หรือเอาสินค้าออกจากกล่องจะแคบกว่ามิติด้านอื่น ๆ กล่องกระดาษแบบท่อเป็นรูปทรงกล่องที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากสามารถใช้บรรจุสินค้าอุปโภคบริโภคได้หลากหลายทั้งที่เป็นก้อน เป็นเม็ด เป็นผง และสามารถใส่บรรจุในสายการบรรจุระบบอัตโนมัติด้วยความเร็วสูงได้



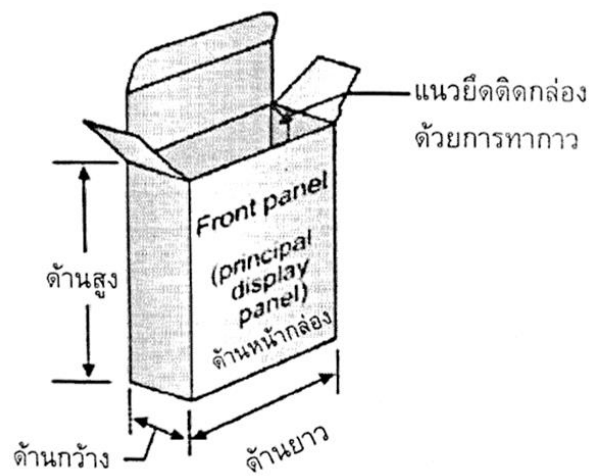
ภาพที่ 2.6 รูปทรงกล่องกระดาษพับได้

ที่มา: มานิตย์ กมลสุวรรณ และพิกามาศ พงษ์แก้ว (2558, น.3-7,8)

2) การยึดติดเป็นตัวกล่อง ลักษณะการยึดติดเป็นตัวกล่องกระดาษพับได้ มี 2 ลักษณะ ได้แก่ (1) แบบยึดติดที่มุมกล่อง ด้วยการล็อก (lock) การสอด การทากาว การใช้แถบกาว การปิดผนึกด้วยความร้อน หรือการเย็บลวด มักใช้กับกล่องแบบถาด ตัวอย่างเช่น กล่องใส่เบเกอรี่ และ (2) แบบยึดติดด้านข้างกล่อง โดยการยึดติดตลอดแนวลิ้นกล่องด้านข้างด้วยการทากาว หรือการปิดผนึกด้วยความร้อน มักใช้กับกล่องแบบท่อ ตัวอย่างเช่น กล่องใส่หลอดไฟ ตัวกล่องที่มีการยึดติดทั้งสองลักษณะ การปิดส่วนฝาและก้นกล่องอาจใช้การสอดลิ้นเสียบเข้าไปภายในกล่อง หรือการทากาว



(ก) กล่องกระดาษแบบถาดที่ยึดติดที่มุมกล่องด้วยการทากาว



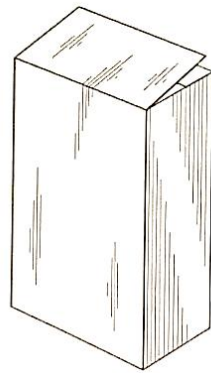
(ข) กล่องกระดาษแบบถาดที่ยึดติดที่มุมกล่องด้วยการทากาว

ภาพที่ 2.7 ลักษณะการยึดติดเป็นตัวกล่องกระดาษพับได้

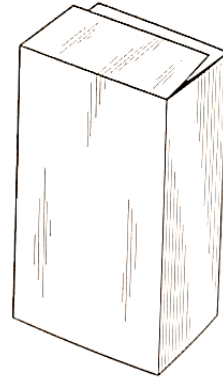
ที่มา: มานิตย์ กมลสุวรรณ และพγμαมาศ พงญแกลั่ว (2558, น.3-10,11)

3) รูปแบบฝาปิด กล่องกระดาษมีการออกแบบให้มีฝาปิดในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบฝาติดกาว แบบฝาสอด แบบฝาล็อก

(1) *กล่องแบบฝาติดกาว* (glue end carton) เป็นกล่องที่มีฝาด้านในและด้านนอกปิดทับกัน โดยทากาวให้ฝาดัดกัน กล่องที่มีความกว้างของฝาด้านนอกปิดทับสนิทกับฝาด้านใน เรียกว่ากล่อง FOSE (Full-Overlap Seal End) ยังมีกล่องที่ออกแบบให้ฝากล่องด้านนอกและด้านในปิดทับกันบางส่วน โดยความกว้างของฝาด้านนอกน้อยกว่าฝาด้านใน เรียกว่า กล่อง POSE (Partial-Overlap Seal End) กล่องแบบฝาติดกาวนิยมใช้บรรจุสินค้าที่เป็นผงหรือเม็ด เช่น ผงแป้ง เมล็ดธัญพืช หรือป้องกันการเปิดก่อนใช้ เช่น สบู่ก้อน



(ก) แบบ FOSE

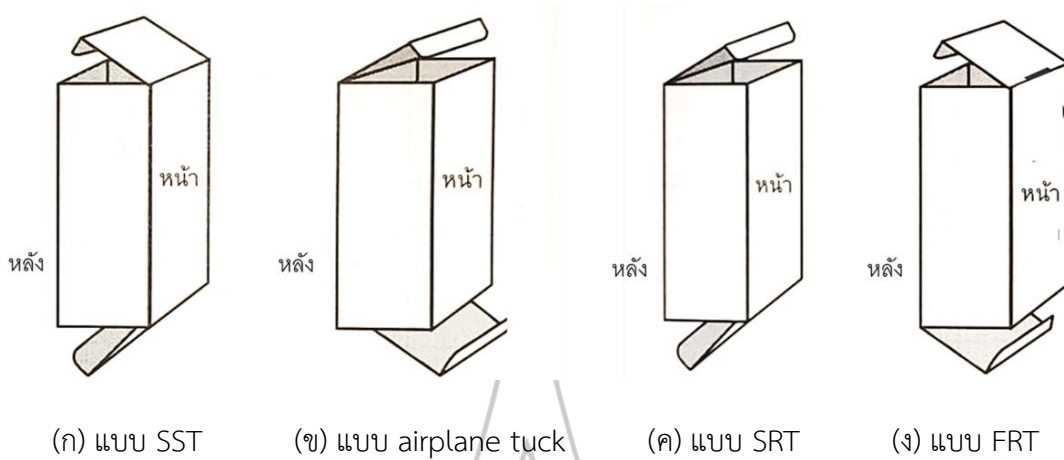


(ข) แบบ POSE

ภาพที่ 2.8 กล่องแบบฝาติดกาว

ที่มา: สุภาวดี อีธรรมมาร (2558, น. 9-10)

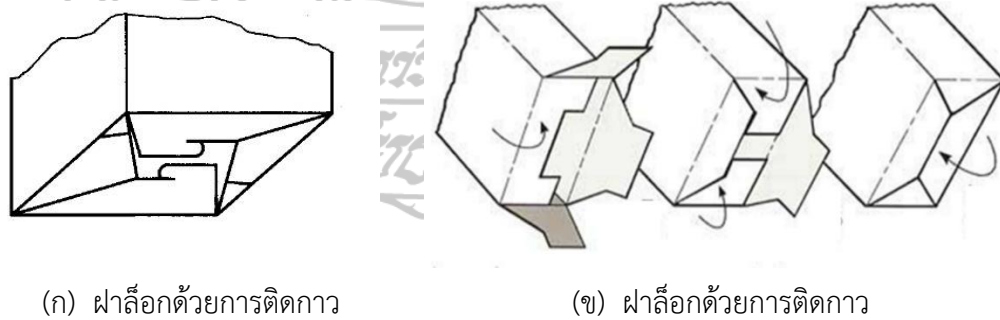
(2) *กล่องแบบฝาสอด* (tuck-end carton) เป็นกล่องที่ฝาปิดให้มีลิ้นสอดเข้าไปภายในกล่องเพื่อปิดกล่อง เมื่อเปิดกล่องแล้วจะปิดกลับได้ หากต้องการป้องกันการเปิดกล่องก่อนถึงมือผู้บริโภค อาจใช้เทปกาวปิดที่ฝากล่อง การออกแบบกล่องแบบฝาสอดที่ใช้กันทั่วไปมี 4 แบบ ได้แก่ แบบฝาบนและฝาล่างอยู่ด้านเดียวกันโดยฝาบนและฝาล่างปิดจากหน้าไปหลัง (standard straight tuck, SST) (ภาพที่ 2.9 (ก)) แบบฝาบนและฝาล่างอยู่ด้านเดียวกันโดยฝาบนและฝาล่างปิดจากหลังมาหน้า (airplane tuck) (ภาพที่ 2.9 (ข)) แบบฝาบนและฝาล่างอยู่สลับด้านกัน โดยฝาบนปิดจากหลังมาหน้า (standard reverse tuck, SRT) (ภาพที่ 2.9 (ค)) และแบบฝาบนและฝาล่างอยู่สลับด้านกัน โดยฝาบนปิดจากหน้าไปหลัง (French reverse tuck, FRT) (ภาพที่ 2.9 (ง))



ภาพที่ 2.9 รูปแบบกล่องแบบฝาสอด

ที่มา: สุภาวดี อีรธรรมากร (2558, น. 9-11)

(3) *กล่องแบบฝาล็อก* (lock end carton) เป็นกล่องที่ปิดฝากล่องโดยใช้ฝาปิดสอดไขว้ และล็อกคระหว่างกัน ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่ากล่องฝาสอด ช่วยให้รับน้ำหนักสินค้าได้มากขึ้น ฝาล็อกมักใช้เป็นฝาล่างหรือก้นกล่องมี 2 แบบ ได้แก่ ฝาล็อกด้วยการติดกาว (auto lock) และฝาล็อกด้วยการสอด (snap lock) ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 รูปแบบกล่องแบบฝาล็อก

ที่มา: http://www.imperialbox.net/images/site/custom-box-styles_6.jpg

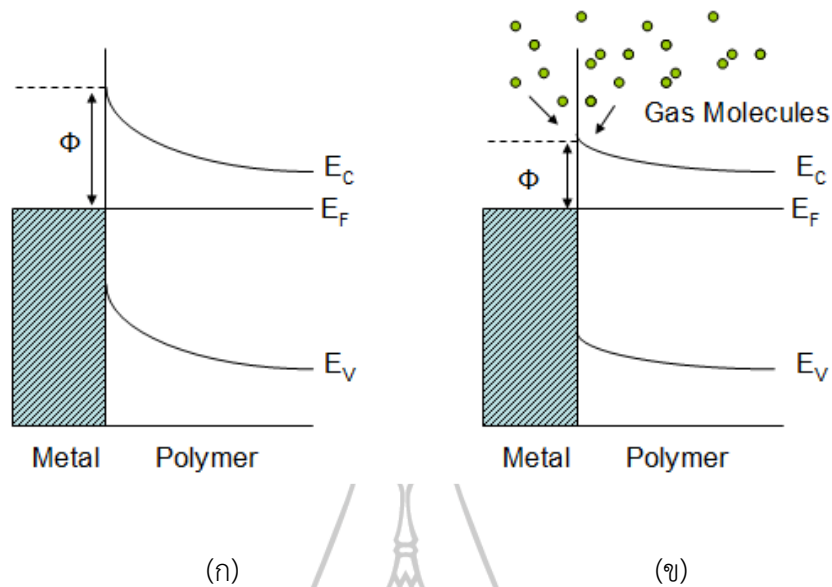
ปัจจุบันมีแนวโน้มการพัฒนาบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษมีมากขึ้น จากกระแสการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทั่วโลก เนื่องจากบรรจุภัณฑ์กระดาษผลิตมาจากวัตถุดิบที่เป็นพืช สามารถย่อยสลายได้ง่าย ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถนำกระดาษที่ใช้แล้วมาเวียนผลิตใหม่ได้อีก ซึ่งมีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระดาษในด้านต่าง ๆ เช่น การออกแบบด้านกราฟิกและการพิมพ์ให้สวยงามมากขึ้น การใช้วัสดุประสมระหว่างกระดาษ พลาสติก หรือฟอยล์อะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มสมบัติการใช้งานสำหรับบรรจุของเหลว และการปกป้องสินค้าได้มากขึ้น การพัฒนาโครงสร้างและรูปทรงบรรจุภัณฑ์ให้มีความหลากหลายมากกว่ารูปทรงสี่เหลี่ยม

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยจำนวนมากไม่เพียงแต่ความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ แต่การเติมสารเติมแต่งบางอย่างในหมึกพิมพ์จะทำให้หมึกพิมพ์มีสมบัติพิเศษเพิ่มเติม เช่น การตรวจจับแก๊สบางอย่างได้ โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหมึกพิมพ์พอลิเมอร์ และหมึกพิมพ์คาร์บอน ซึ่งตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลซึ่งเป็นที่ยอมรับ กล่าวโดยสรุป ดังนี้

Srichan และคณะ (2009) ได้ศึกษาการพิมพ์สารนำไฟฟ้า PEDOT:PSS ลงบนแผ่นรองรับ PET ด้วยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก และเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของหยดหมึกพิมพ์พบว่า สาร PET มีความตึงผิวสูง โดยเป็นเกรนขนาดใหญ่ประมาณ 20 ไมโครเมตร แต่ลักษณะดังกล่าวลดลงเมื่อใช้วิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก นอกจากนี้ การอบอ่อน (Anneal) หมึกพิมพ์ PEDOT:PSS ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 3 เท่า

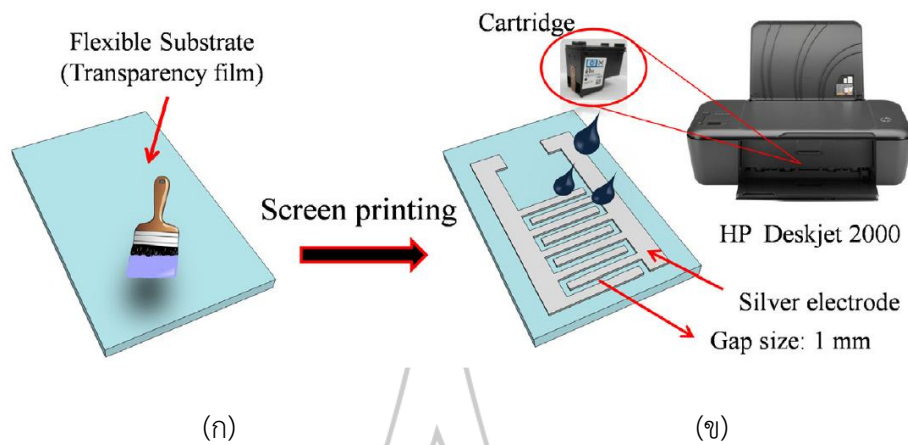
Wongchoosuk และคณะ (2012) ได้ศึกษาการพิมพ์สาร PEDOT:PSS ลงบนแผ่นรองรับ PET ที่มีขั้วไฟฟ้าเงินด้วยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก พบว่า สาร PEDOT:PSS ตอบสนองได้ดีต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง และเสนอกลไกการรับรู้แก๊สของสาร PEDOT:PSS ว่าเป็นผลมาจากการโค้งงอของแถบพลังงานการนำ (conducting energy band; E_C) แถบพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy band; E_F) และแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence energy band; E_V) ที่รอยต่อระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ เมื่อโมเลกุลแก๊สแอมโมเนียมาติดที่พื้นผิวสาร PEDOT:PSS ทำให้ฟังก์ชันงาน (work function; ϕ) มีค่าลดลง แสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แผนภาพแถบพลังงานที่รอยต่อระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะเมื่อ (ก) ไม่มี และ (ข) มีโมเลกุลแก๊สมาติดที่พื้นผิวสาร PEDOT:PSS

ที่มา: Wongchoosuk และคณะ (2012, pp.41)

Seekaew และคณะ (2014) ได้ศึกษาหิมักพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสาร PEDOT:PSS ด้วยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก โดยนำสาร PEDOT:PSS ผสมกับกราฟีน (Graphene) ได้เป็นสาร Graphene-PEDOT:PSS แล้วพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ PET ด้วยวิธีการพิมพ์สกรีนเป็นขั้วไฟฟ้าเงิน แสดงดังภาพที่ 2.12 พบว่า สาร Graphene-PEDOT:PSS ตอบสนองได้ดีต่อแก๊สแอมโมเนีย แม้ว่าแผ่น PET อยู่ในสถานะที่โค้งงอ



ภาพที่ 2.12 แผนภาพการเตรียมตัวอย่าง (ก) การพิมพ์ขั้วไฟฟ้าเงินด้วยวิธีการพิมพ์แบบสกรีน และ (ข) การพิมพ์สาร Graphene-PEDOT:PSS ด้วยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก

ที่มา: Seekaew และคณะ (2014, pp.2974)

Han และคณะ (2014) ได้ศึกษาหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes; CNTs) และสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ โซเดียม โดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (Sodium Dodecylbenzenesulfonate; SDBS) แล้วเขียนลงบนกระดาษประเภทต่าง ๆ ได้แก่ กระดาษสำเนา และแก้วน้ำที่ทำจากกระดาษ แสดงดังภาพที่ 2.13 ทดสอบการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์กับวงจรไดโอดชนิดเปล่งแสง (Light Emitting Diode; LED) พบว่า หมึกพิมพ์สามารถนำไฟฟ้าได้ดี แสดงดังภาพที่ 2.14



(ก)

(ข)

(ค)

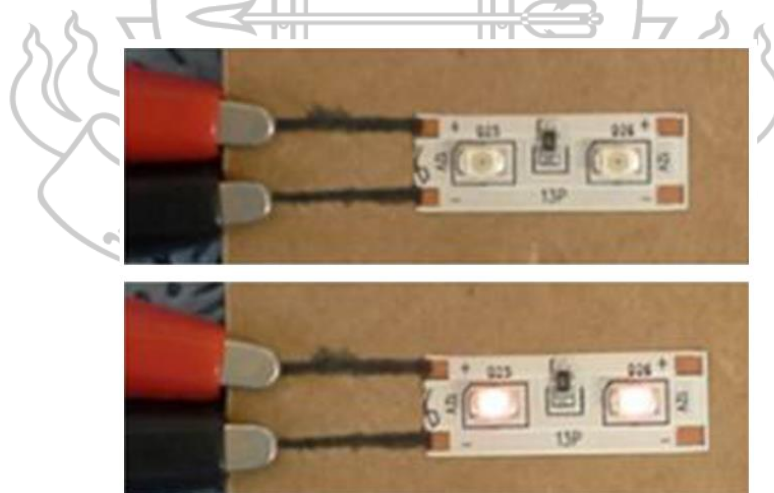
(ก) ปากกาหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่บรรจุสาร CNT-SDBS

(ข) การเขียนหมึกพิมพ์ CNT-SDBS ลงบนกระดาษสำเนา

(ค) การเขียนหมึกพิมพ์ CNT-SDBS ลงบนแก้วชนิดกระดาษ

ภาพที่ 2.13 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes; CNTs) และสารลดแรงตึงผิว

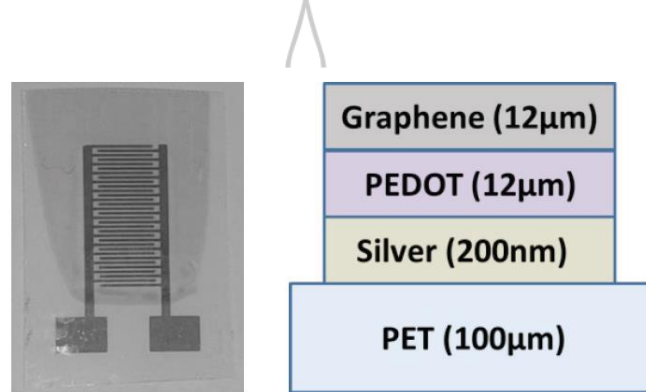
ที่มา: Han และคณะ (2014, pp.250)



ภาพที่ 2.14 การทดสอบการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ CNT-SDBS

ที่มา: Han และคณะ (2014, pp.252)

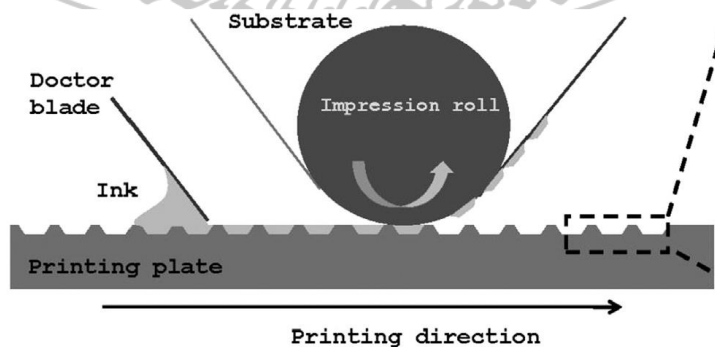
Andó และคณะ (2015) ได้ศึกษาหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสาร PEDOT และกราฟีน ความหนาชั้นละ 12 ไมโครเมตรโดยพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ PET ความหนา 100 ไมโครเมตร ที่มีขั้วไฟฟ้าเงิน ความหนา 200 นาโนเมตร ด้วยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก แสดงดังภาพที่ 2.15 พบว่า สามารถตรวจจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide; CO_2) ได้ดีที่อุณหภูมิห้อง



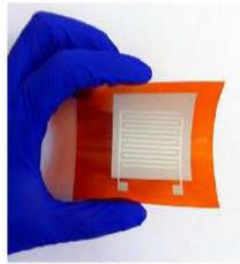
ภาพที่ 2.15 การพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสาร PEDOT และกราฟีน ลงบนแผ่นรองรับ PET ที่มีขั้วไฟฟ้าเงินด้วยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึก

ที่มา: Andó และคณะ (2015, pp.630)

Huang และคณะ (2015) ได้ศึกษาหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสารโลหะทังสเตนออกไซด์ (tungsten oxide; WO_3) และสาร PEDOT:PSS พิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ PI ด้วยวิธีการพิมพ์แบบกราเวียร์ (gravure printing) แสดงดังภาพที่ 2.16 พบว่า หมึกพิมพ์ WO_3 -PEDOT:PSS ตอบสนองได้ดีต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (nitrogen dioxide; NO_2) ที่อุณหภูมิห้อง



(ก) การพิมพ์หมึกนำไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์แบบกราเวียร์

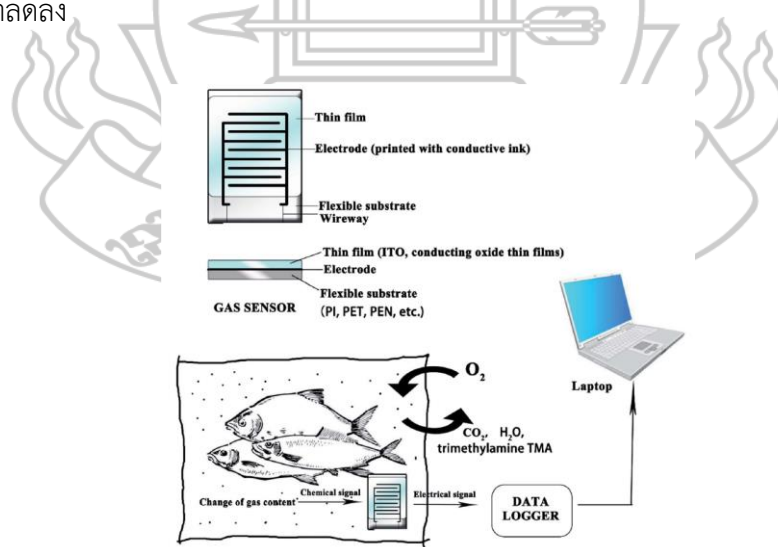


(จ) หมึกพิมพ์ WO_3 -PEDOT:PSS บนแผ่นรองรับ PI

ภาพที่ 2.16 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสารโลหะทังสเตนออกไซด์ (tungsten oxide; WO_3) และสาร PEDOT:PSS พิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ PI ด้วยวิธีการพิมพ์แบบกราเวียร์

ที่มา: Huang และคณะ (2015, pp.178)

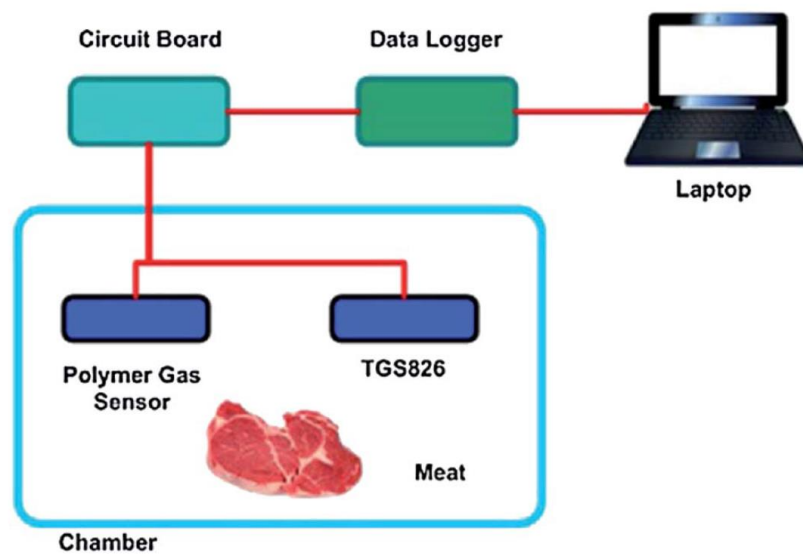
Fan และคณะ (2019) ได้ศึกษาเรื่องสาร PEDOT:PSS สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการใช้งาน กล่าวว่า เมื่อปริมาณ PEDOT:PSS มากขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์จะมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองหมึกพิมพ์ไฟฟ้า PEDOT:PSS มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการพองตัวของ DMSO มีผลทำให้ PEDOT:PSS กระจายตัวได้ไม่ดี ส่งผลให้การนำไฟฟ้าลดลง



ภาพที่ 2.17 การประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าโลหะออกไซด์สำหรับบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ

ที่มา: Liao และคณะ (2019, pp.29165)

Liao และคณะ (2019) ได้ศึกษาวงจรไฟฟ้าแบบพิมพ์ โดยประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โลหะออกไซด์สำหรับบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Intelligent Food Packaging; IFP) โดยใช้เป็นเซ็นเซอร์แก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากการบรรจุแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณที่เหมาะสมภายในบรรจุภัณฑ์ มีผลทำให้เนื้อปลามีความสดได้ในระยะเวลานานมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.17 นอกจากนี้ยังพบว่า หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าพอลิเมอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะได้ด้วย โดยพบว่า สามารถใช้ตรวจสอบปริมาณแก๊สแอมโมเนียภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งสามารถระบุความสดของหมูเนื้อแดง (Red Meat) ได้ แสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 การประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าพอลิเมอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ

ที่มา: Liao และคณะ (2019, pp.29166)

การนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ ยังคงได้รับความสนใจจากนักวิจัย และนักพัฒนาบรรจุภัณฑ์ทั่วโลก ปัจจัยหลักที่ทำให้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าได้รับความสนใจ คือ ต้นทุนที่ต่ำในการผลิต อีกทั้งสามารถผลิตได้จำนวนมากโดยใช้เวลาไม่นาน เนื่องจากใช้เทคโนโลยีการพิมพ์เข้ามาช่วยในขั้นตอนการผลิต สำหรับงานวิจัยนี้ ได้นำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าประเภทพอลิเมอร์ มาประยุกต์ใช้งานในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า เพื่อให้สามารถตรวจสอบคุณภาพหลอดไฟฟ้า ขณะที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษางานวิจัย เรื่อง การวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า มีวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.1.1.1 *พอลิเมอร์นำไฟฟ้า* ได้แก่ พอลิ (3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน) พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate, PEDOT:PSS)

3.1.1.2 *ตัวทำละลาย* ได้แก่ ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide; DMSO)

3.1.1.3 *สารป้องกันการแข็งตัว* ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol; EG)

3.1.1.4 *สารลดแรงตึงผิว* ได้แก่ ออกทิลฟีนอลอีทอกซีเลต (Octyl phenol ethoxylate) หรือไตรตัน-เอ็กซ์ (Triton-X)

3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการผสมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.1.2.1 *บีกเกอร์* ขนาด 50 มิลลิลิตร และขนาด 200 มิลลิลิตร ใช้ตวงส่วนผสมของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ที่มีส่วนผสมของสาร PEDOT:PSS สาร DMSO สาร EG และสาร Triton-X100 ในสัดส่วนต่าง ๆ ตามที่กำหนดในการทดลอง

3.1.2.3 *ไมโครปิเปต* ความจุ 100-1,000 มิลลิลิตร ใช้ตวงสาร PEDOT:PSS สาร DMSO สารEG สาร TRITON-X100 ในปริมาตรตามสัดส่วนของแต่ละสารที่กำหนดในการทดลอง

3.1.2.4 *เครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็ก* ใช้กวนสาร PEDOT:PSS , DMSO, EG, TRITON-X100 ที่ตามสัดส่วนที่กำหนดในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

3.1.2.5 *เครื่องล้างความถี่เหนือเสียง (GT Ultrasonic Cleaner)* ใช้สำหรับล้างทำความสะอาดลับหมึกพิมพ์ และอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) กำลังขยาย 60,000 เท่า ใช้ขยายภาพชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าและวัดค่าความหนาของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่สามารถนำไฟฟ้าได้จากภาพของภาคตัดขวาง (cross-section) เพื่อกำหนดจำนวนชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจากการพิมพ์หมึกสามารถนำไฟฟ้าได้

3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.1.3.1 เครื่องพิมพ์พ่นหมึก ยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112 ใช้สำหรับพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่สัดส่วนต่าง ๆ บนแผ่นพลาสติก PET

3.1.3.2 แผ่นพลาสติก PET ความหนา 0.5 ไมโครเมตร ใช้เป็นแผ่นรองรับการพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความต้านทานไฟฟ้า

3.1.4.1 เครื่องมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Sanwa รุ่น CD770 ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าในสัดส่วนต่าง ๆ ที่พิมพ์บนแผ่น PET เพื่อแสดงเบื้องต้นว่าหมึกพิมพ์ที่เตรียมได้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า

3.1.4.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ใช้สำหรับเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในการทดสอบการวัดความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.1.4.3 ตัวต้านทาน ใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบในวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (voltage divider circuit) สำหรับการวัดความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.1.4.4 โปรแกรม LabVIEW 2018 สำหรับวัดและแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่วัดได้ทุกวินาที

3.1.4.5 โปรแกรม ImageJ ใช้สำหรับวิเคราะห์ความหนา และคำนวณหาค่าความหนาเฉลี่ยของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.1.5 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ และทดสอบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

3.1.5.1 คอมพิวเตอร์พกพา (Notebook) ยี่ห้อ Acer และโปรแกรม Adobe Illustrator ใช้ในการออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

3.1.5.2 หลอดไฟชนิด LED ความต่างศักย์ ไฟฟ้า 12 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุอยู่ในต้นแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

3.1.5.3 กระดาษแข็ง น้ำหนักพื้นฐาน 400 กรัมต่อตารางเมตร (400 แกรม) สำหรับทำต้นแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า มีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

3.2.1 การเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ผสมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยตวงปริมาตรส่วนประกอบของสาร PEDOT:PSS สาร DMSO สาร EG และสาร Triton-X ด้วยไมโครปิเปตลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ตามสัดส่วนที่กำหนด 10 สัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นผสมให้สารเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องกวนสาร ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ทำเช่นนี้จนครบทุกสัดส่วน

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมในการทดลอง

สัดส่วน ส่วนผสม	สัดส่วน									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
PEDOT:PSS	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
DMSO	50	45	40	35	30	25	20	15	15	5
EG	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Triton x-100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

3.2.2 การพิมพ์หมึกพิมพ์ไฟฟ้าด้วยการพิมพ์พ่นหมึก

3.2.2.1 เตรียมเครื่องพิมพ์พ่นหมึก โดยนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่ผสมแต่ละสัดส่วน ในปริมาตร 1,000 ไมโครลิตร ใส่ลงในตลับหมึกพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึกยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112 ทดลองพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เพื่อหาความหนาชั้นหมึกพิมพ์

3.2.2.2 ทดลองพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เพื่อหาความหนาชั้นหมึกพิมพ์ โดยพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS บนแผ่นพลาสติก PET จำนวน 1, 2, 3, 4, 5 ชั้น ในแต่ละแผ่น โดยกำหนดให้ภาพที่พิมพ์มีขนาด 1 เซนติเมตร × 0.8 เซนติเมตร เพื่อทดสอบหาความหนาชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่สามารถนำไฟฟ้าได้ พบว่าการพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS จำนวน 5 ชั้นจึงเริ่มนำไฟฟ้าได้

3.2.2.3 วัดความหนาชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า แผ่นพิมพ์ที่พิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS จำนวน 5 ชั้นด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) กำลังขยาย 60,000 เท่า เพื่อหาความหนาชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่สามารถนำไฟฟ้าได้

3.2.2.4 พิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS บนแผ่นพลาสติก PET โดยใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ผสมตามสัดส่วนในตารางที่ 3.1 จำนวน 10 สัดส่วน ภาพพิมพ์ขนาด 1 เซนติเมตร × 0.8 เซนติเมตร แต่ละแผ่นพิมพ์พิมพ์ 5 ชั้น และหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสัดส่วนพิมพ์ 3 ตัวอย่าง

3.2.3 การหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.2.3.1 วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยนำแผ่นพลาสติก PET ที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS แต่ละสัดส่วนไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเวลา 300 วินาที พร้อมบันทึกผลด้วยโปรแกรม LabVIEW 2018 ซึ่งในแต่ละสัดส่วนได้ทำซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่าง และนำไปหาค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าของแต่ละสัดส่วน

3.2.3.2 คำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยนำค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละสัดส่วนมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้า

3.2.3.3 คำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยนำค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้ มาคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้า เพื่อหาสัดส่วนหมึกพิมพ์ PEDOT:PSS ที่สามารถนำไฟฟ้าได้สูงสุด และนำไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

3.2.4 การออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

3.2.4.1 ออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator โดยออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์กล่องบรรจุภัณฑ์ภายนอก เป็นกล่องกระดาษแข็งแบบพับได้ (folding carton box) และเพิ่มโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ใช้เป็นส่วนยึดขั้วหลอดไฟฟ้า ป้องกันการกระแทกของหลอดไฟฟ้าขณะเคลื่อนย้าย และส่วนที่ 2 เป็นชิ้นส่วนวงจรนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสำหรับใช้ทดสอบการทำงานหลอดไฟฟ้า

3.2.4.2 ออกแบบลายเส้นวงจรไฟฟ้าสำหรับพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในสัดส่วนที่มีค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำสุด หรือสภาพนำไฟฟ้าสูงสุดมาพิมพ์บนแผ่นพลาสติก PET ที่ใช้เป็นโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2 เพื่อเชื่อมต่อขั้วบวกและขั้วลบของหลอดไฟฟ้าได้

3.2.4.3 จัดทำต้นแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า โดยโครงสร้างบรรจุภัณฑ์กล่องบรรจุภัณฑ์ภายนอก ใช้กระดาษแข็ง 400 กรัมต่อตารางเมตร และโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ใช้แผ่นพลาสติก PET เพื่อนำไปใช้ทดสอบหลอดไฟฟ้าที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าในขั้นต่อไป

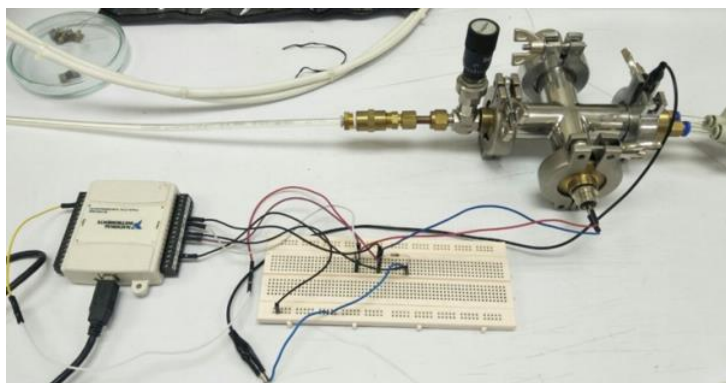
3.2.5 ขั้นตอนการทดสอบหลอดไฟฟ้าที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

3.2.5.1 พิมพ์ลายเส้นวงจรไฟฟ้าด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS โดยนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในสัดส่วนที่ให้ค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำสุด หรือค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงสุดบนแผ่นพลาสติก PET ของโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์ส่วนที่ 2 ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Ink Jet) ยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112

3.2.5.2 ทดสอบหลอดไฟฟ้าในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า โดยประกอบโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน โดยส่วนที่ 1 ยึดขั้วหลอดไฟฟ้า และส่วนที่ 2 แผ่นพลาสติก PET ที่ผ่านการพิมพ์ลายเส้นวงจรไฟฟ้าด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ลงในกล่องบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ จากนั้นบรรจุหลอดไฟฟ้าชนิด LED ความต่างศักย์ ไฟฟ้า 12 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ ลงในกล่องบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า เพื่อทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า โดยการทดลองต่อหลอดไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์กระแสตรง ในขณะที่หลอดไฟฟ้าบรรจุอยู่ภายในบรรจุภัณฑ์

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วย ตัวต้านทาน สายไฟขนาดเล็ก บอร์ดวงจรไฟฟ้า ตัวประมวลผล (NI USB DAQ 6008) ดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยดำเนินการทดสอบในระบบปิดแสดงผลโดยใช้โปรแกรม LABView 2018 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงผลค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของแต่ละสัดส่วนของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจำนวน 300 วินาที ทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ทำการทดลองมีส่วนผสมของ (PEDOT:PSS): DMSO:EG: TRITON-X แตกต่างกัน 10 สัดส่วน



ภาพที่ 3.1 ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ขนาด 1 เซนติเมตร × 0.8 เซนติเมตร ลงบนแผ่นพลาสติก PET จากนั้นนำไปทดสอบชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเวลา 300 วินาที และบันทึกผลด้วยโปรแกรม LabVIEW 2018 โดยในแต่ละสัปดาห์จะทำซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่าง จากนั้นนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละครั้ง และแต่ละสัปดาห์

3.4.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เมื่อได้ค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ของแต่ละสัปดาห์แล้ว นำมาคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพนำไฟฟ้า พร้อมบันทึกผล เพื่อหาสัปดาห์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่เหมาะสมที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี การคำนวณโดยใช้สมการคำนวณดังนี้

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l}{wt} \longrightarrow \rho = \frac{R(wt)}{l}$$

- โดยที่
- R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)
 - ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม·เมตร ($\Omega \cdot m$)
 - l คือ ความยาวของตัวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตร (m)
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)
 - w คือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตร (m)
 - t คือ ความหนาของตัวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตร (m)

บทที่ 4

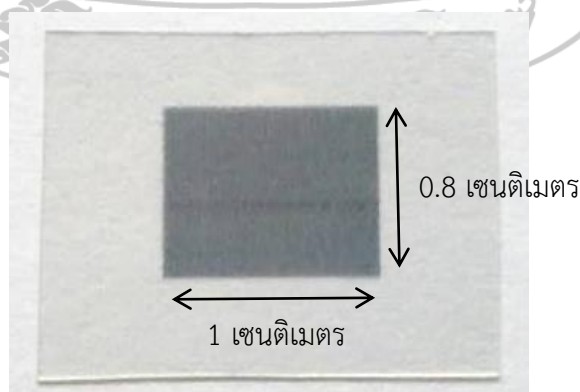
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า และนำไปประยุกต์ใช้บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าเพื่อทดสอบหลอดไฟฟ้าที่บรรจุอยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ได้ ผลการศึกษาวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

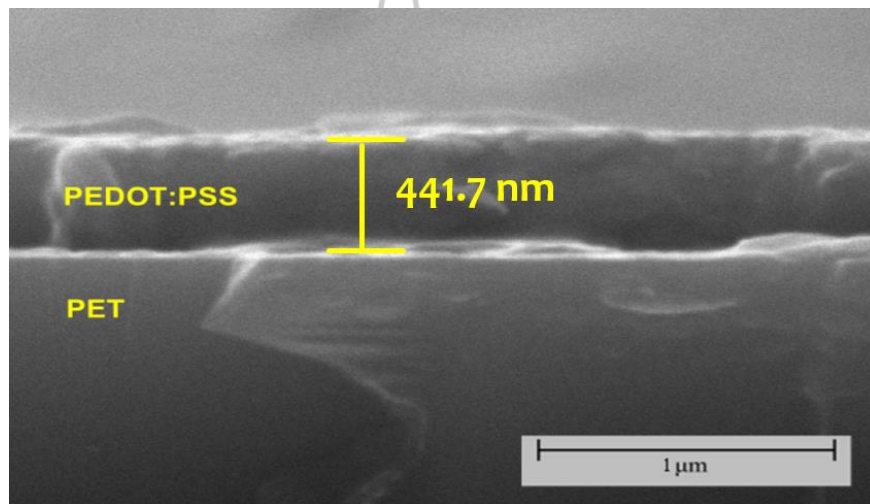
4.1.1 ความหนาชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สำหรับการพิมพ์พ่นหมึก

การวิเคราะห์หาสัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าโดยการพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าด้วยสัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 แตกต่างกัน 10 สัดส่วนบนแผ่นพลาสติก PET ด้วยการพิมพ์พ่นหมึก โดยพิมพ์พื้นที่ขนาดภาพพิมพ์ 1 เซนติเมตร \times 0.8 เซนติเมตร ดังภาพที่ 4.1 เนื่องจากความหนาชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีผลต่อการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า จึงได้ทดลองหาความหนาชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่สามารถนำไฟฟ้าได้คงที่ด้วยการพิมพ์หมึกพิมพ์จำนวนชั้นหมึกพิมพ์ 1, 2, 3, 4, 5 ชั้น การทดลองพบว่า การพิมพ์หมึกพิมพ์จำนวน 5 ชั้น จะเริ่มสามารถนำไฟฟ้าได้ จึงใช้จำนวน 5 ชั้นในการพิมพ์นี้เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนของ PEDOT:PSS ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.1 ภาพพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS บนแผ่นพลาสติก PET

การวัดค่าความหนาของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จากภาพภาคตัดขวาง (cross-section) ของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 60,000 เท่า และวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม ImageJ โดยวัดค่าความหนาจำนวน 20 ครั้ง และคำนวณหาค่าเฉลี่ย พบว่า ความหนาเฉลี่ยของชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เท่ากับ 441.7 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM แบบภาคตัดขวางแสดงความหนาของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

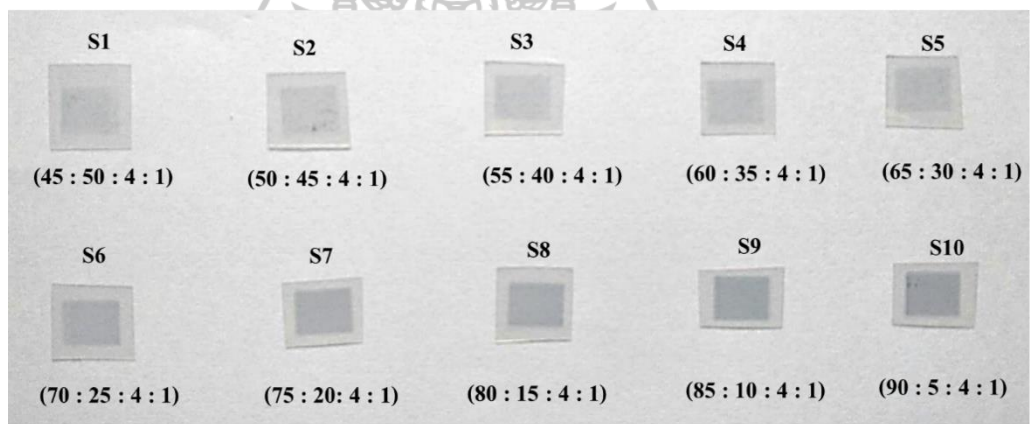
4.1.2 สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ในการทดลองได้ศึกษาสัดส่วนของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS โดยมีสัดส่วน (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 แตกต่างกัน 10 สัดส่วน (S1-S10) เป็นตัวแปรอิสระดังตารางที่ 4.1 ส่วนตัวแปรตามที่ศึกษา คือ สภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ แต่เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าได้โดยตรง จึงได้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้า และนำไปคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้า และวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าต่อไป การพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสัดส่วนได้ทำซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ย

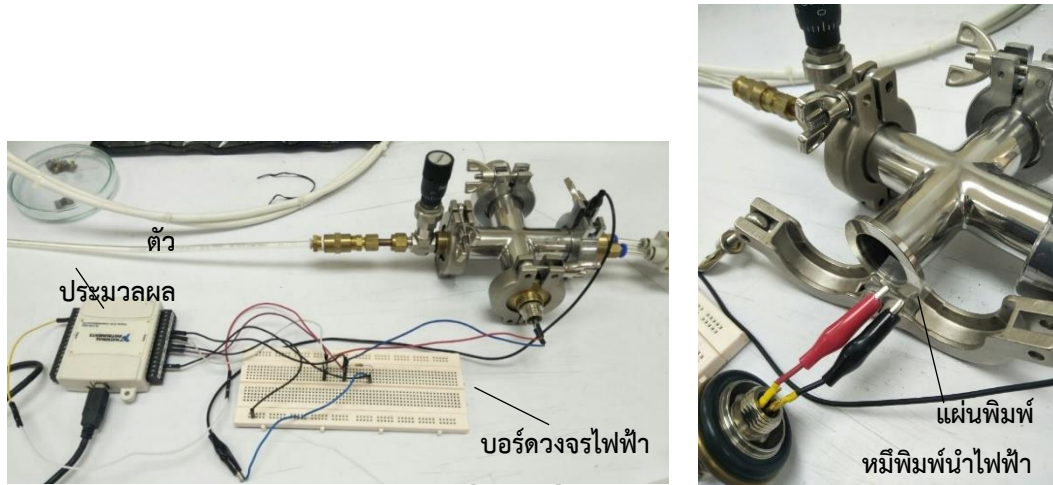
ตารางที่ 4.1 สัดส่วนหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

ส่วนผสม	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
PEDOT:PSS	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
DMSO	50	45	40	35	30	25	20	15	15	5
EG	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Triton x-100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

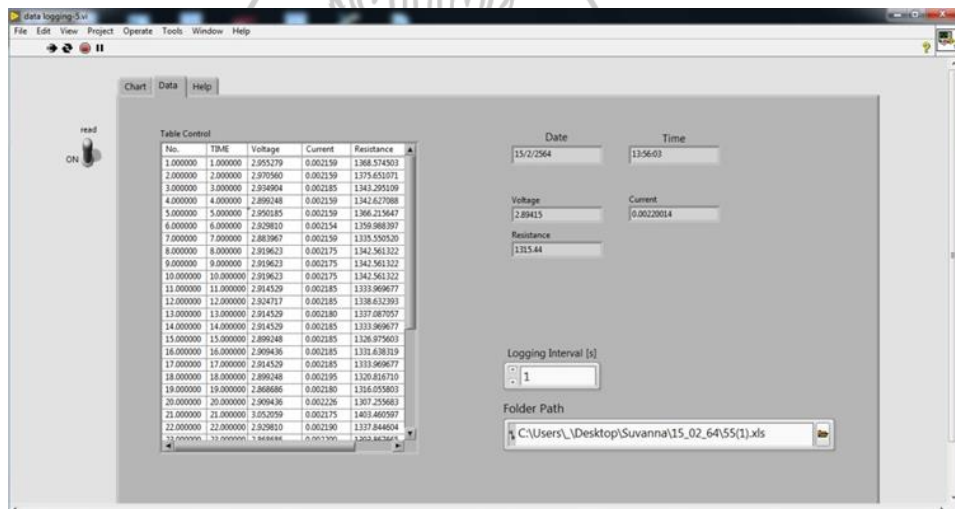
ภาพพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสัดส่วน (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ใน 10 สัดส่วนที่ได้ แสดงในภาพที่ 4.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ดำเนินการโดยใช้ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง แสดงในภาพที่ 4.4 ประกอบด้วย ตัวต้านทาน สายไฟขนาดเล็ก บอร์ดวงจรไฟฟ้า ตัวประมวลผล (NI USB DAQ 6008) ดำเนินการทดสอบในระบบปิด แสดงผลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2018 วัดค่าทุก 1 วินาที เป็นเวลา 300 วินาที แสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.3 ภาพพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสัดส่วน (PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ใน 10 สัดส่วน

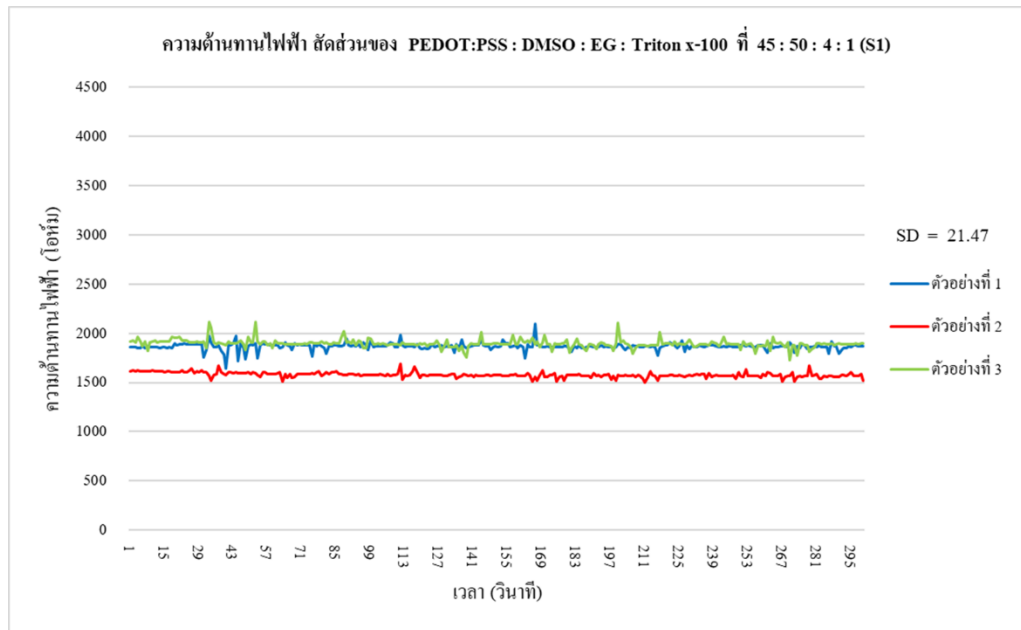


ภาพที่ 4.4 ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรงใช้วัดความต้านทานไฟฟ้า
ของภาพพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

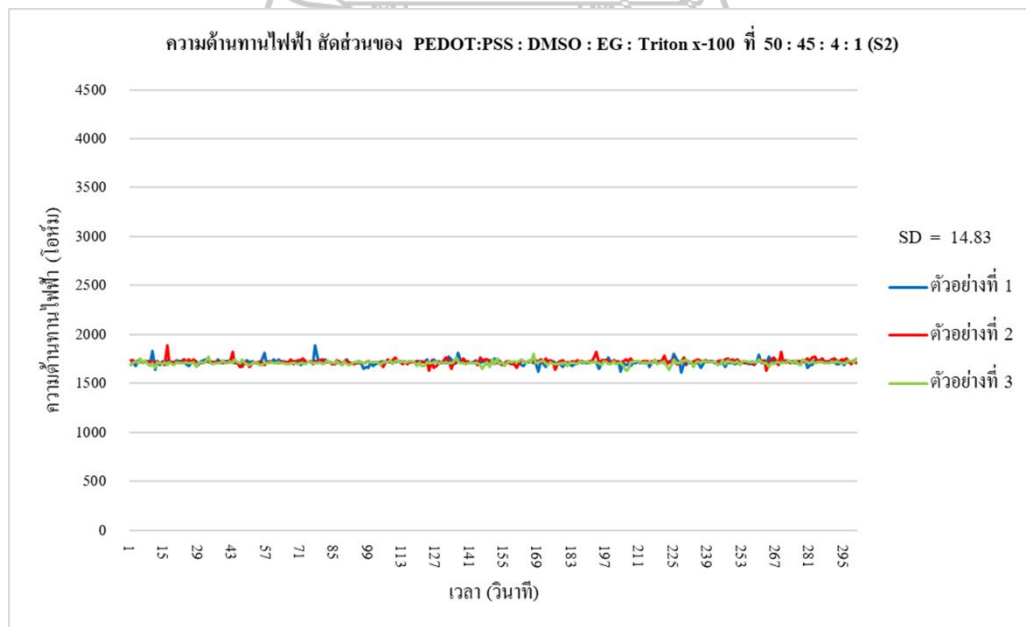


ภาพที่ 4.5 โปรแกรม LabVIEW2018 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากภาพพิมพ์
หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

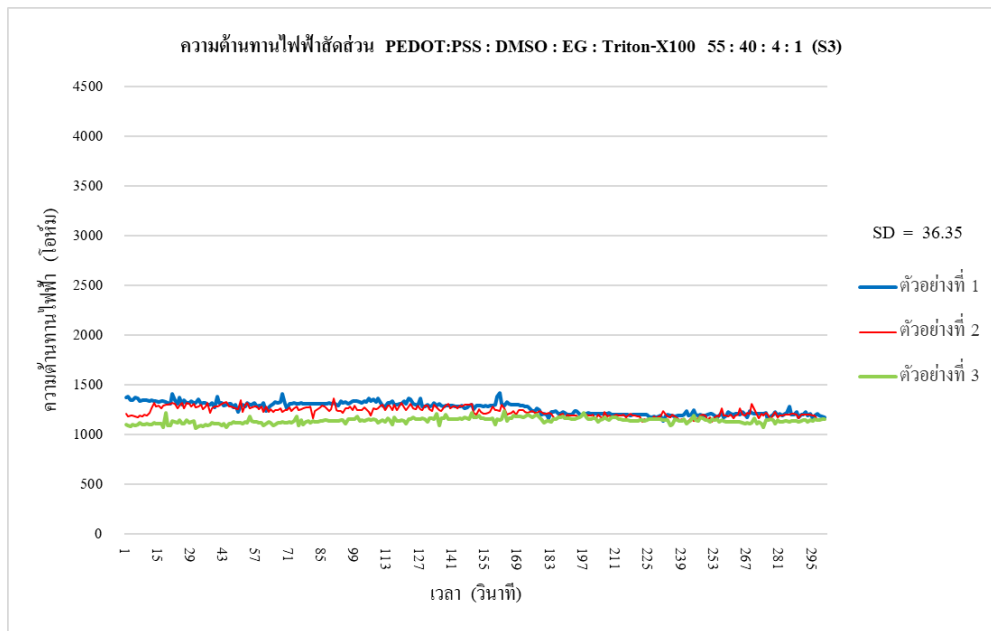
ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของ หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ใน 10 สัดส่วน ตามตารางที่ 4.1 โดยแต่ละครั้งวัดค่าได้ 300 ค่า และหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสัดส่วนมี 3 ตัวอย่าง กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS แต่ละสัดส่วนแสดงในภาพที่ 4.6 – ภาพที่ 4.15



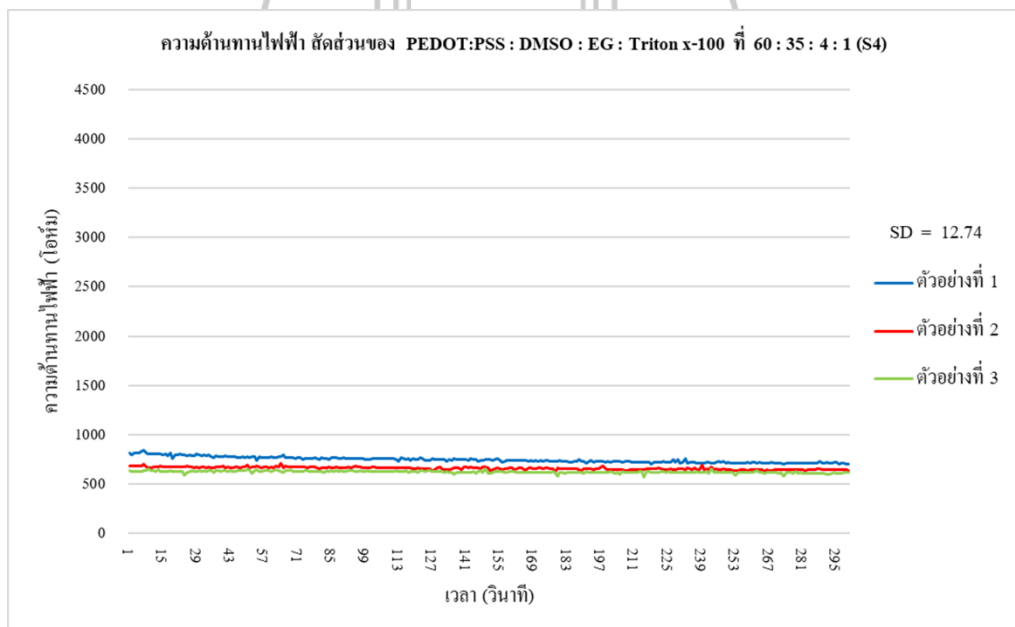
ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S1)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1



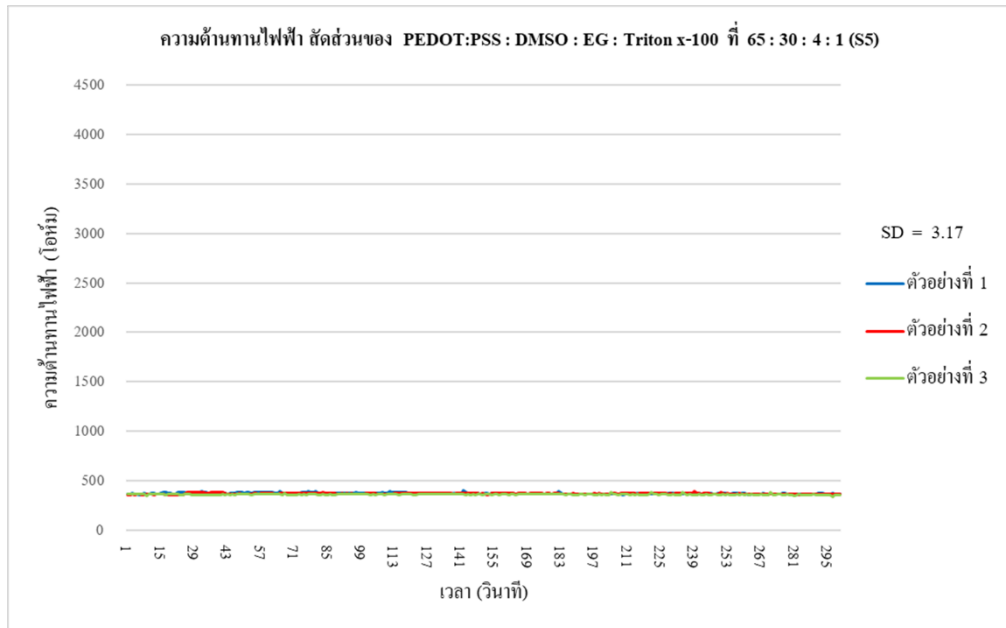
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S2)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 50 : 45 : 4 : 1



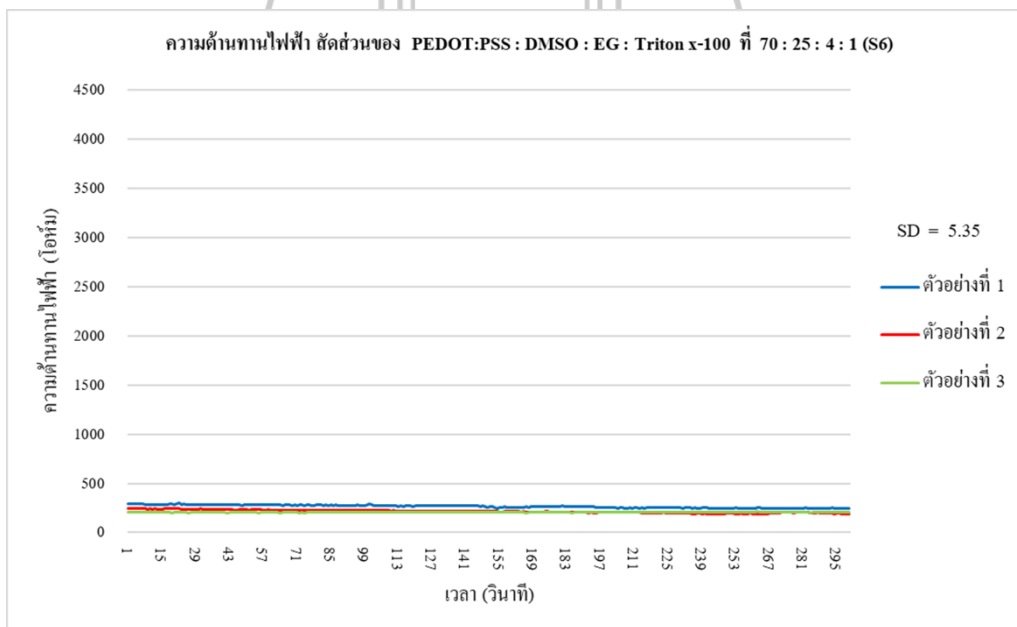
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัปดาห์ (S3)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1



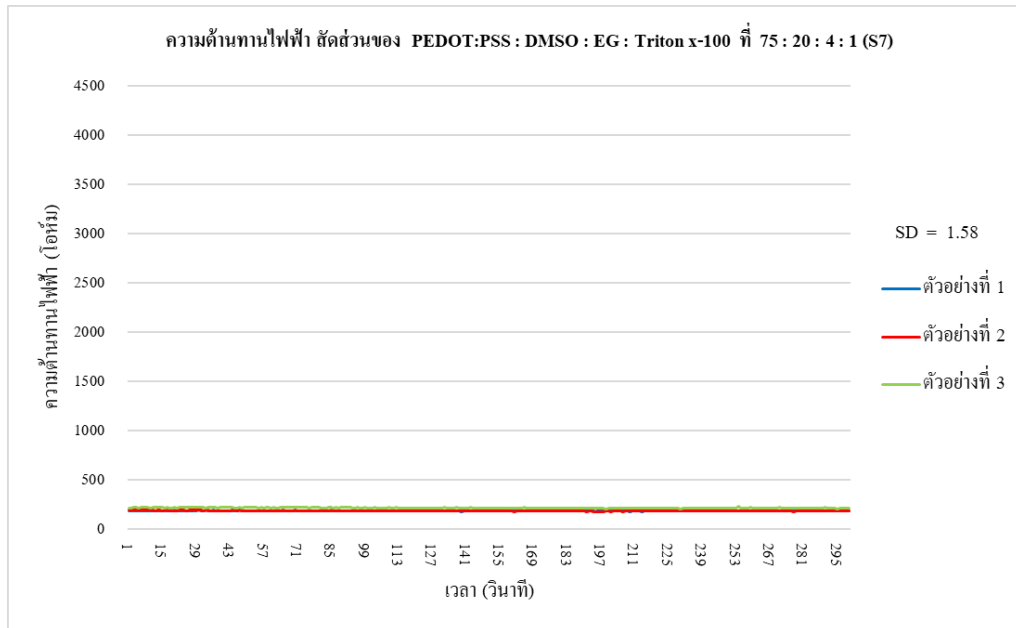
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัปดาห์ (S4)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1



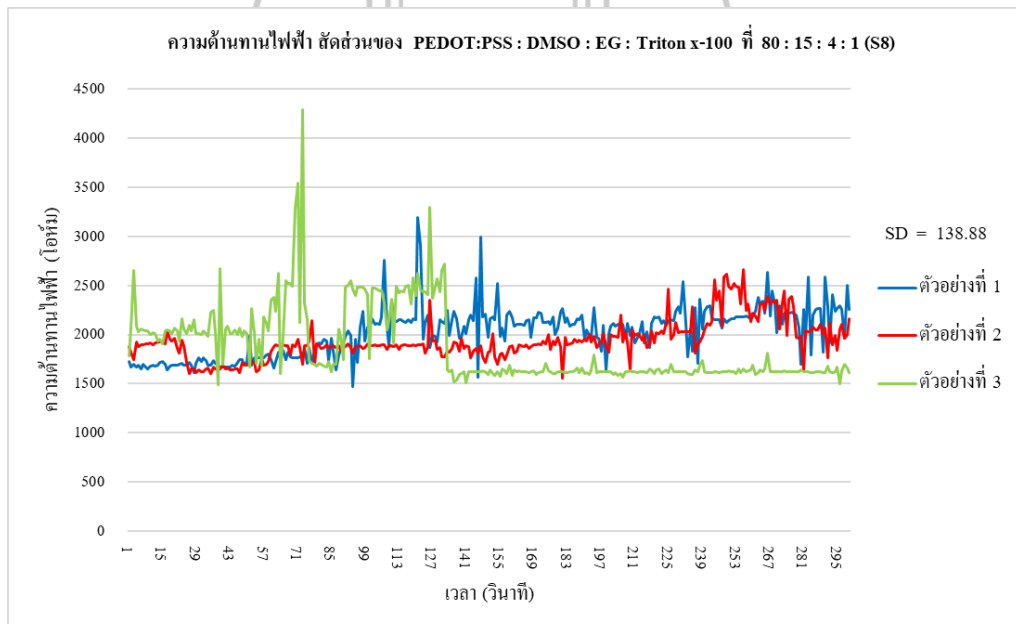
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัปดาห์ (S5)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1



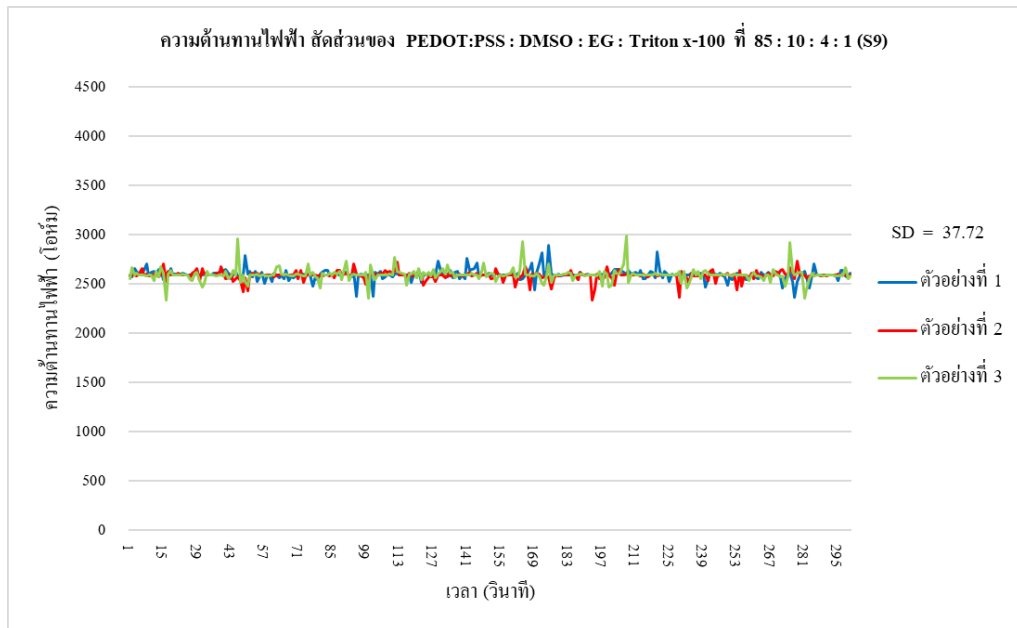
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัปดาห์ (S6)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1



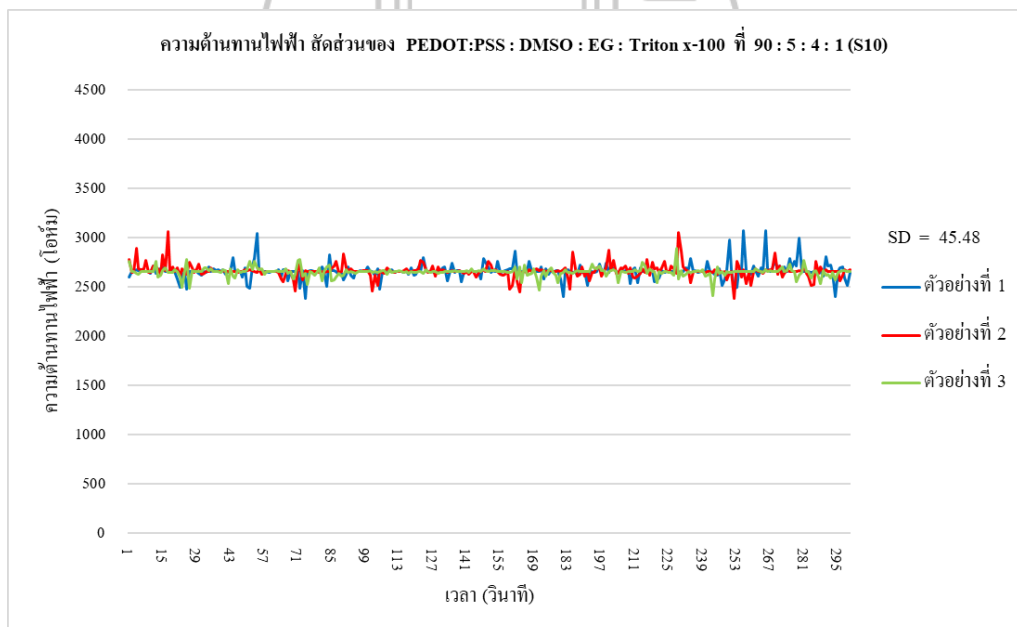
ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัปดาห์ (S7)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัปดาห์ (S8)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S9)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 85 : 15 : 4 : 1



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วน (S10)
(PEDOT:PSS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1

จากผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสัดส่วนที่วัดแต่ละวินาทีในช่วงเวลา 300 วินาทีแต่ละตัวอย่าง และใน 3 ตัวอย่าง พบว่า หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มี PEDOT:PSS ในสัดส่วนเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าคงที่สม่ำเสมอที่ดีขึ้น เห็นได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) มีแนวโน้มลดลง โดยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสัดส่วน PEDOT:PSS ต่อ DMSO ที่ 65:30, 70:25, 75:20 ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าคงที่สม่ำเสมอที่ดี โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) = 3.17, 5.35, 158 ตามลำดับ แต่เมื่อสัดส่วน PEDOT ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูงมากขึ้นในสัดส่วน PEDOT:PSS ต่อ DMSO ที่ 80:15, 85:10, 90:5 ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ในช่วงเวลา 300 วินาทีที่วัดแต่ละครั้ง และใน 3 ตัวอย่าง โดยเฉพาะที่สัดส่วน 80:15 ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 138.88

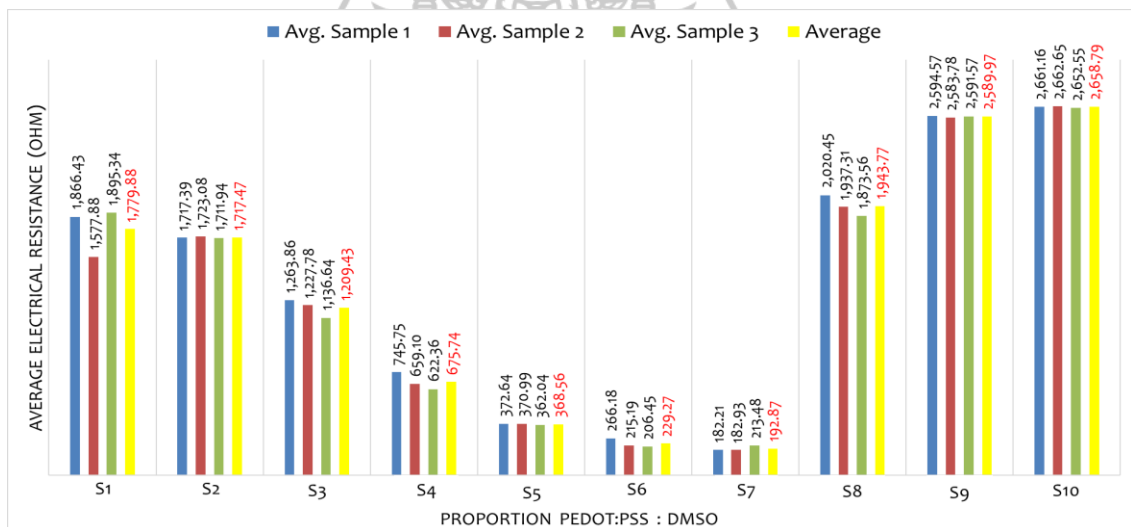
เมื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า 10 สัดส่วน (S1-S10) ในแต่ละตัวอย่าง และค่าเฉลี่ยรวมของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสัดส่วน ได้ผลค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ใน 10 สัดส่วน แสดงในตารางที่ 4.2 และดั่งกราฟในภาพที่ 4.16

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ใน 10 สัดส่วน

สัดส่วน หมึกพิมพ์ นำไฟฟ้า	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3		ค่าเฉลี่ยรวม (โอห์ม)
	ช่วงค่าที่ วัดได้	ค่าเฉลี่ย	ช่วงค่าที่ วัดได้	ค่าเฉลี่ย	ช่วงค่าที่ วัดได้	ค่าเฉลี่ย	
	(โอห์ม)	\bar{X} (โอห์ม)	(โอห์ม)	\bar{X} (โอห์ม)	(โอห์ม)	\bar{X} (โอห์ม)	
S1	1,640.8 – 2,097.2	1,866.43	1,504.5 – 1,686.4	1,577.88	1,731.4 – 2,116.8	1,895.34	1,779.88
S2	1,615.1 – 1,893.1	1,717.39	1,627.3 – 1,877.8	1,723.08	1,631.2 – 1,805.4	1,711.94	1,716.47
S3	1,130.9 – 1,414.6	1,263.86	1,121.1 – 1,364	1,227.78	1,062.5 – 1,231	1,136.64	1,209.43
S4	697.1– 842.7	745.75	619.8 – 712.5	659.10	570.6 – 656.7	622.36	675.74
S5	355.6 – 399.1	372.64	353.7 – 389.5	370.99	339.5 – 381.2	362.04	368.56
S6	243.0– 298.0	266.18	190.4 – 248.3	215.19	201.4 – 213.7	206.45	229.27

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

สัดส่วน หมึกพิมพ์ นำไฟฟ้า	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3		ค่าเฉลี่ยรวม (โอห์ม)
	ช่วงค่าที่ วัดได้	ค่าเฉลี่ย \bar{X} (โอห์ม)	ช่วงค่าที่ วัดได้	ค่าเฉลี่ย \bar{X} (โอห์ม)	ช่วงค่าที่ วัดได้	ค่าเฉลี่ย \bar{X} (โอห์ม)	
	(โอห์ม)	(โอห์ม)	(โอห์ม)	(โอห์ม)	(โอห์ม)	(โอห์ม)	
S7	170.2 – 196.2	182.21	168.4 – 193.0	182.93	201.6 – 229.9	213.48	192.87
S8	1,469.2 – 3,139.1	2,020.45	1,556 – 2,657.3	1,937.31	1,494.6 – 4,283.3	1,873.56	1,943.77
S9	2,360.6 – 2,889.6	2,594.57	2,333.3 – 2,723.5	2,583.78	2,331.2 – 2,989.2	2,591.57	2,589.97
S10	3,286 – 3,069.2	2,661.16	2,388 – 3,060.8	2,662.65	2,411.1 – 2,898	2,652.55	2,658.79



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS 10 สัดส่วน

ผลการทดลองค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS พบว่า สัดส่วนที่ S7 คือ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 เท่ากับ 75 : 20 : 4 : 1 ควรเป็น สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ 192.87

4.2 ผลการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

จากค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ย (R) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในแต่ละสัปดาห์ได้นำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) และค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) จากสมการ ดังนี้

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l}{wt}$$

ดังนั้น

$$\rho = \frac{R (wt)}{l}$$

และ

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

โดยที่ R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)

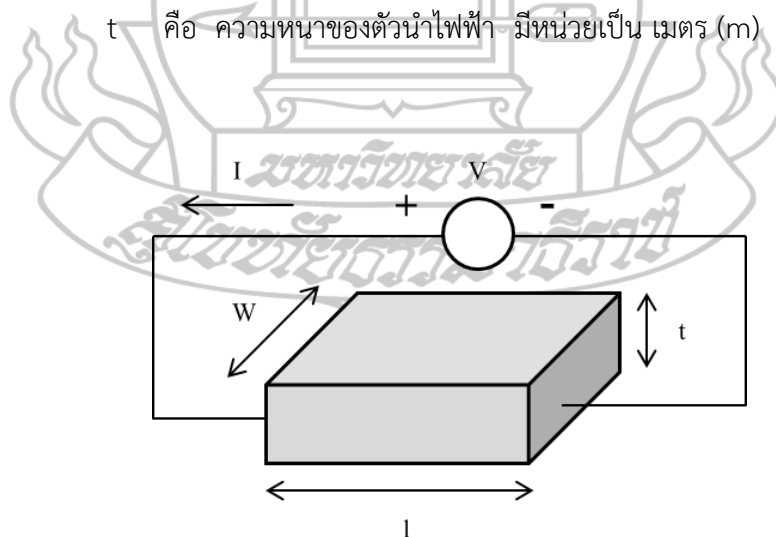
σ คือ สภาพนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (โอห์ม.เมตร)⁻¹ ($\Omega \cdot m$)⁻¹

l คือ ความยาวของตัวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตร (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m²)

w คือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตร (m)

t คือ ความหนาของตัวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตร (m)



ภาพที่ 4.17 แผนภาพแสดงความยาว ความกว้าง และความหนาของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่พิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติก PET

ในการพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วนต่าง ๆ บนแผ่นพลาสติก PET ค่าความยาวของตัวนำไฟฟ้า (l) และค่าความกว้างของตัวนำไฟฟ้า (w) ได้จากการกำหนดขนาดภาพที่พิมพ์ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1 เซนติเมตร (หรือ 1×10^{-2} เมตร) และ 0.8 เซนติเมตร (หรือ 0.8×10^{-2} เมตร) เป็นค่า w ตามลำดับ ค่าความหนาของหมึกพิมพ์ (t) ได้จากค่าเฉลี่ยที่มาจากาวัดหนาของชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ตามภาพที่ 4.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 441.7 นาโนเมตร (หรือ 441.7×10^{-9} เมตร) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ใน 10 สัดส่วนที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.3

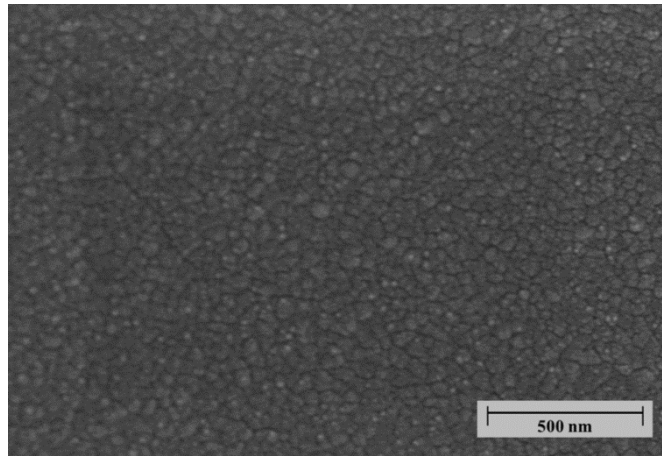
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในสัดส่วนต่าง ๆ

สัดส่วน PEDOT:PSS ใน หมึกพิมพ์ นำไฟฟ้า	ค่าเฉลี่ย ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) (Ω)	ค่าเฉลี่ย สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ($\Omega \cdot m$)	ค่าเฉลี่ย สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ($\Omega \cdot m$) ⁻¹
45 (S1)	1,779.88	6.29×10^{-4}	1,589.98
50 (S2)	1,717.47	6.06×10^{-4}	1,647.76
55 (S3)	1,209.43	4.27×10^{-4}	2,339.93
60 (S4)	675.74	2.39×10^{-4}	4,187.99
65 (S5)	368.56	1.30×10^{-4}	7,678.55
70 (S6)	229.27	0.81×10^{-5}	12,343.39
75 (S7)	192.87	0.68×10^{-5}	14,672.65
80 (S8)	1,943.77	6.94×10^{-4}	1,440.18
85 (S9)	2,589.97	9.15×10^{-4}	1,092.67
90 (S10)	2,658.79	9.39×10^{-4}	1,064.39

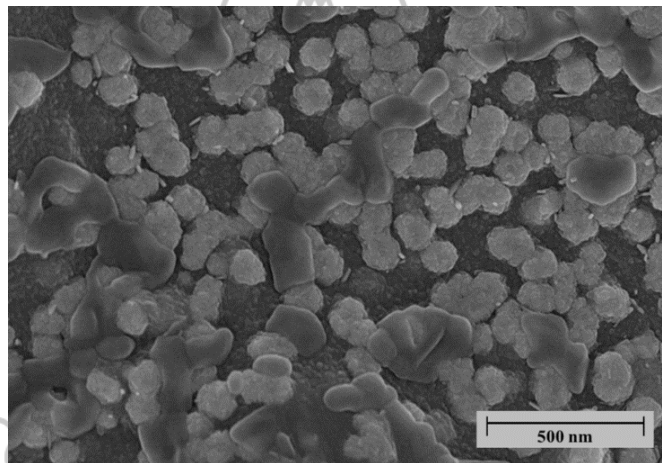
จากตารางที่ 4.3 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วน S1, S2, S3, S4, S5, S6 และ S7 มีค่าเท่ากับ 6.29×10^{-4} , 6.06×10^{-4} , 4.27×10^{-4} , 2.39×10^{-4} , 1.30×10^{-4} , 0.81×10^{-5} และ 0.68×10^{-5} โอห์ม·เมตร ตามลำดับ ขณะที่ค่าสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเท่ากับ 1,589.98, 1,647.76, 2,339.93, 4,187.99, 7,678.55, 12,343.39, 14,672.65 (โอห์ม·เมตร)⁻¹ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวแสดงว่า เมื่อหมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีปริมาณ PEDOT:PSS ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ให้สภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สูงขึ้น โดยพบว่าสัดส่วนของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ให้สภาพนำไฟฟ้าสูงที่สุด คือ สัดส่วนที่ S7 ที่มีสัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 เท่ากับ 75 : 20 : 4 : 1

ส่วนหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วน S8, S9 และ S10 มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 6.94×10^{-4} , 9.15×10^{-4} และ 9.39×10^{-4} โอห์ม·เมตร ตามลำดับ และมีค่าสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเท่ากับ 1,440.18, 1,092.67, 1,064.39 (โอห์ม·เมตร)⁻¹ ซึ่งกลับมีสภาพนำไฟฟ้าลดลง แม้ว่าจะมีปริมาณสาร PEDOT:PSS ในหมึกพิมพ์เพิ่มขึ้นก็ตาม ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการพร่องของ DMSO ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวละลายในหมึกพิมพ์ มีผลทำให้ PEDOT:PSS กระจายตัวได้ไม่ดี ส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xi Fan (2019)

ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาโครงสร้างอนุภาคหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนของ PEDOT:PSS กับ DMSO ที่ 75:20 ซึ่งให้สภาพนำไฟฟ้าสูงสุด กับโครงสร้างอนุภาคหมึกพิมพ์ไฟฟ้าที่มีสัดส่วนของ PEDOT:PSS กับ DMSO ที่ 80:15 ซึ่งให้สภาพนำไฟฟ้าเริ่มลดลง โดยนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสัดส่วนมาพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์หมึกบนแผ่นพลาสติก PET จำนวน 5 ครั้ง โดยภาพที่พิมพ์มีขนาด 1 เซนติเมตร × 0.8 เซนติเมตร จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) กำลังขยาย 60,000 เท่า เพื่อถ่ายภาพลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าใน 2 สัดส่วนดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 4.18



(ก)



(ข)

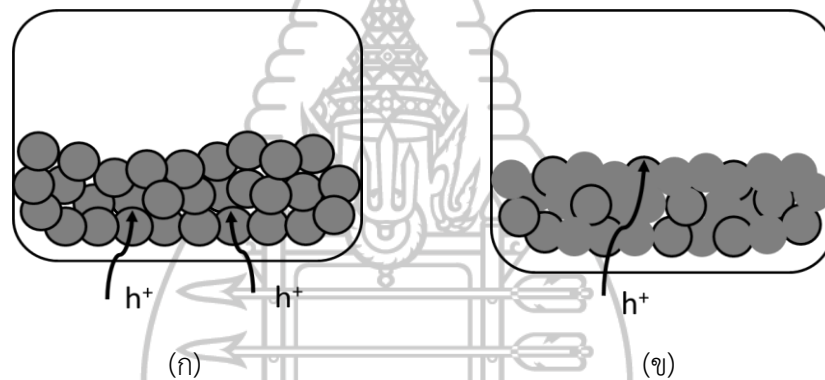
ภาพที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

(ก) สัดส่วนของ (PEDOT:PSS):DMSO ที่ 75:20

(ข) สัดส่วนของ (PEDOT:PSS):DMSO ที่ 80:15

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ภาพที่ 4.18 (ก) แสดงลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสัดส่วนของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75: 20 : 4 : 1 ที่ให้สภาพนำไฟฟ้าได้สูงสุด มีลักษณะเป็นเกรน (grain) ละเอียด มีขนาดประมาณ 25 – 75 นาโนเมตร ส่วนในภาพที่ 4.18 (ข) แสดงลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสัดส่วนของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80: 15 : 4 : 1 ที่ให้สภาพนำไฟฟ้าลดลง มีลักษณะเป็นเกรนขนาดใหญ่ ประมาณ 100 – 300 นาโนเมตร

จากลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่แสดงลักษณะเกรนขนาดต่างกัน ส่งผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสัดส่วน PEDOT:PSS ร้อยละ 75 และ DMSO ร้อยละ 20 ให้ขนาดเกรนเล็ก สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งความสามารถนำไฟฟ้าได้เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวพาหะโฮล (h^+) ได้ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนสาร PEDOT:PSS ร้อยละ 80 ทำให้ปริมาณของ DMSO ลดลงจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 15 มีผลทำให้ขนาดเกรนของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก DMSO ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายของ PEDOT:PSS มีปริมาณไม่เพียงพอ หรือเกิดการพร่องของตัวทำละลาย ทำให้ประสิทธิภาพการเป็นตัวทำละลายในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ลดลง จึงทำให้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีลักษณะเป็นเกรนขนาดใหญ่ และมีผลต่อการเคลื่อนที่ของตัวพาหะโฮล (h^+) ผ่านหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า จึงทำให้มีความสามารถนำไฟฟ้าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของตัวพาหะโฮล (h^+) ผ่านหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

(ก) มีการพร่องของ DMSO

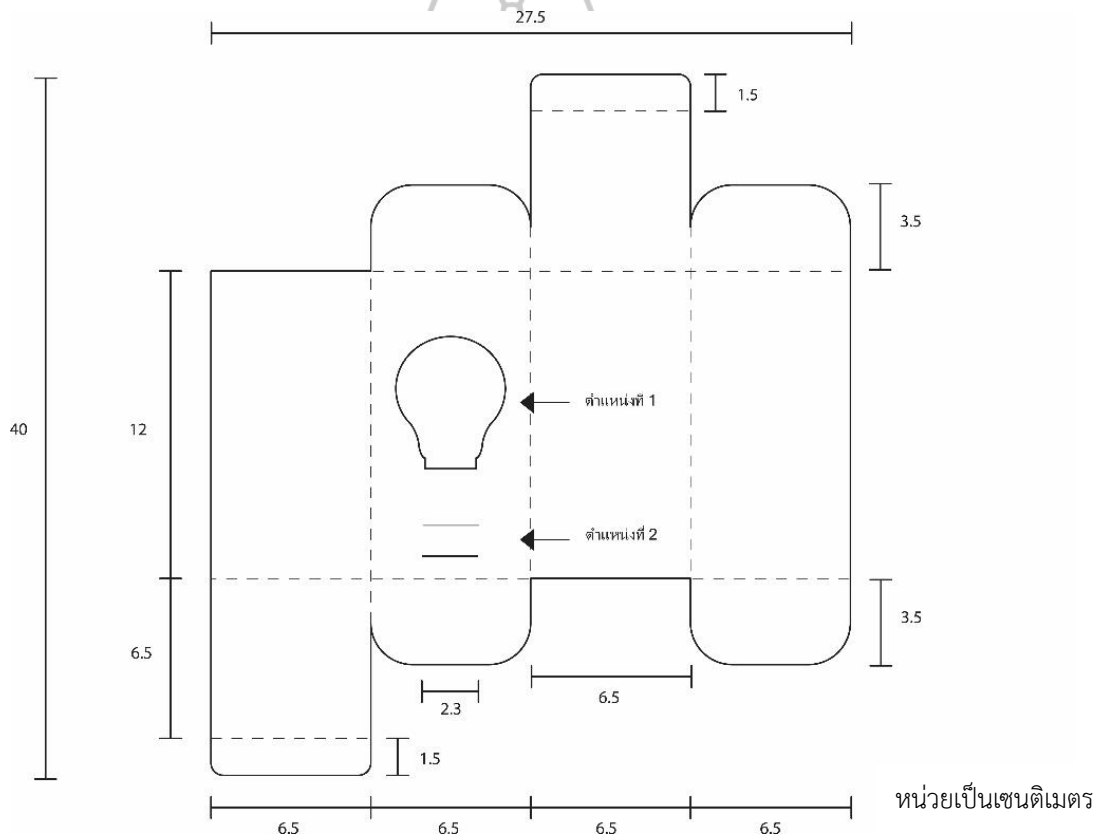
(ข) ไม่มีการพร่องของ DMSO

4.3 ผลการออกแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าที่ประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

การศึกษาวิจัยนี้ มีแนวคิดในการนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มาใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า เพื่อให้บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าสามารถใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าได้ โดยไม่ต้องแกะบรรจุภัณฑ์เพื่อนำหลอดไฟฟ้าออกมาทดสอบกับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า

การออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ได้ออกแบบโครงสร้างภายนอกและภายในกล่องเพื่อบรรจุหลอดไฟฟ้า โครงสร้างภายนอกบรรจุภัณฑ์ออกแบบเป็นกล่องกระดาษพับได้แบบฝาสอด (Tuck end Box) โดยเป็นกล่องแบบฝาด้านบนและฝาด้านล่างสลับด้านกันแบบกล่อง

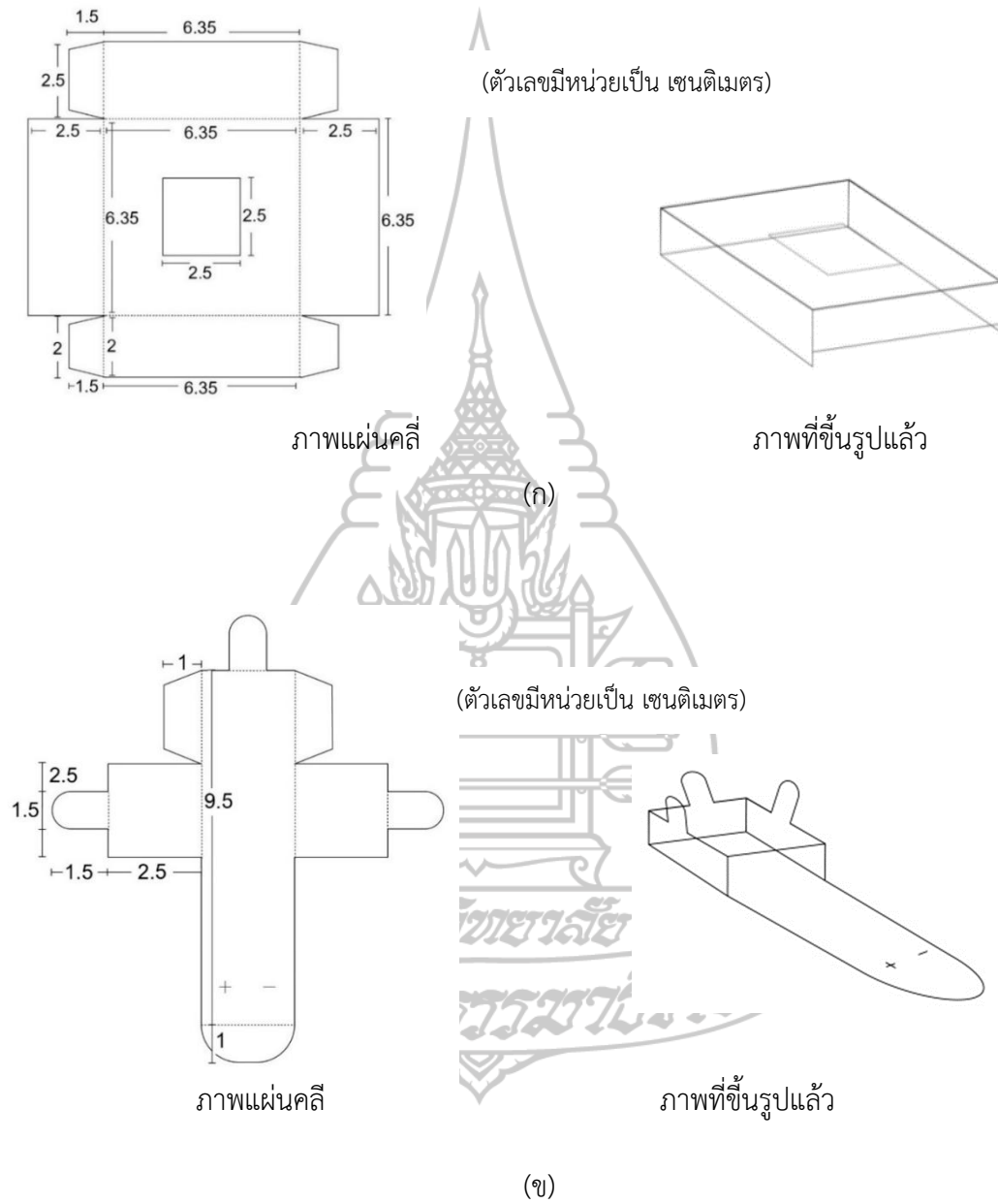
เอสอาร์ที (Standard Reverse Tuck; SRT) มิติของกล่อง กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 6.5 เซนติเมตร x 6.5 เซนติเมตร x 21.5 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถบรรจุหลอดไฟ LED ที่ใช้ทดลองในงานวิจัยได้ โครงสร้างภายนอกกล่องบรรจุภัณฑ์หลอดไฟในตำแหน่งที่ 1 มีการตัดคัท (die cut) ช่องหน้าต่างเป็นรูปหลอดไฟ เพื่อให้มองเห็นการทำงานของหลอดไฟ หรือการเปล่งแสงของหลอดไฟเมื่อทดสอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และตำแหน่งที่ 2 มีการเจาะช่องเป็นเส้นตรงที่ส่วนท้ายของบรรจุภัณฑ์ จำนวน 2 เส้น โดยเส้นล่างใช้เป็นช่องสำหรับดึงแผ่นพลาสติก PET ที่พิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้้าออกขณะทดสอบการทำงานของหลอดไฟ ส่วนเส้นบนใช้เป็นช่องเก็บแผ่นพลาสติก PET ที่พิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้้าสำหรับสอดเก็บแผ่นพลาสติก PET เมื่อไม่ได้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟ ภาพแผ่นคลี่ของกล่องบรรจุภัณฑ์หลอดไฟดังแสดงในภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 โครงสร้างภายนอกบรรจุภัณฑ์หลอดไฟ

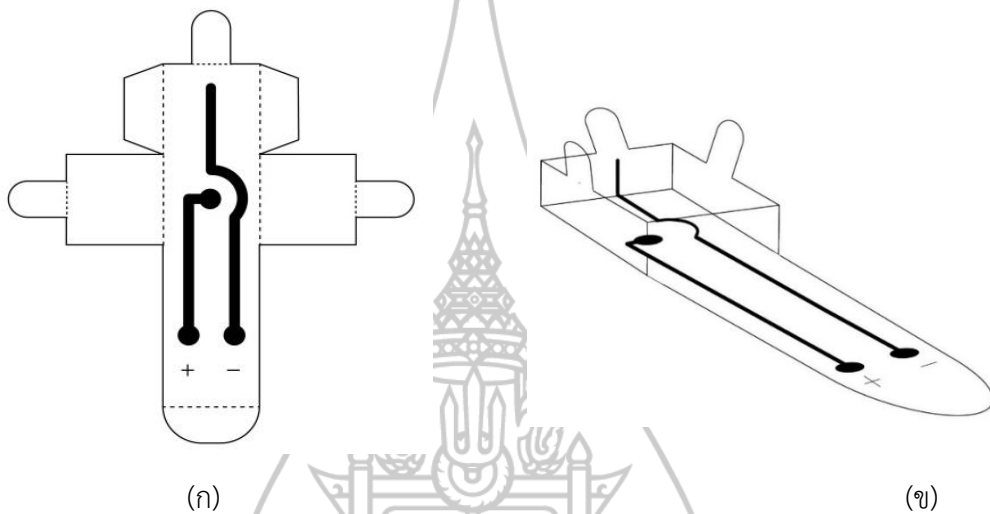
เพื่อให้บรรจุภัณฑ์ประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้้าโดยสามารถทดสอบการทำงานของหลอดไฟโดยไม่ต้องแกะบรรจุภัณฑ์หลอดไฟ จึงได้มีการเพิ่มขึ้นส่วนโครงสร้างภายในจำนวน 2 ส่วนที่เป็นแผ่นพลาสติก PET ส่วนที่ 1 ใช้เป็นส่วนยึดชั่วคราวหลอดไฟ ป้องกันการกระแทกของหลอดไฟขณะ

ขนส่ง สำหรับส่วนที่ 2 เป็นชิ้นส่วนสำหรับใช้ในการทดสอบการทำงานหลอดไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าที่ออกแบบ
 (ก) โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 1
 (ข) โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2

สำหรับโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2 นี้ ได้ทำการออกแบบสร้างลายเส้นวงจรนำไฟฟ้าสำหรับใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า เพื่อพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในสัดส่วนที่ให้สภาพนำไฟฟ้าสูงสุด คือ สัดส่วนของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 โดยพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS บนแผ่นพลาสติก PET เพื่อใช้เป็นวงจรนำไฟฟ้าสำหรับทดสอบหลอดไฟฟ้าในบรรจุภัณฑ์ โดยไม่ต้องนำหลอดไฟฟ้าออกจากบรรจุภัณฑ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.22



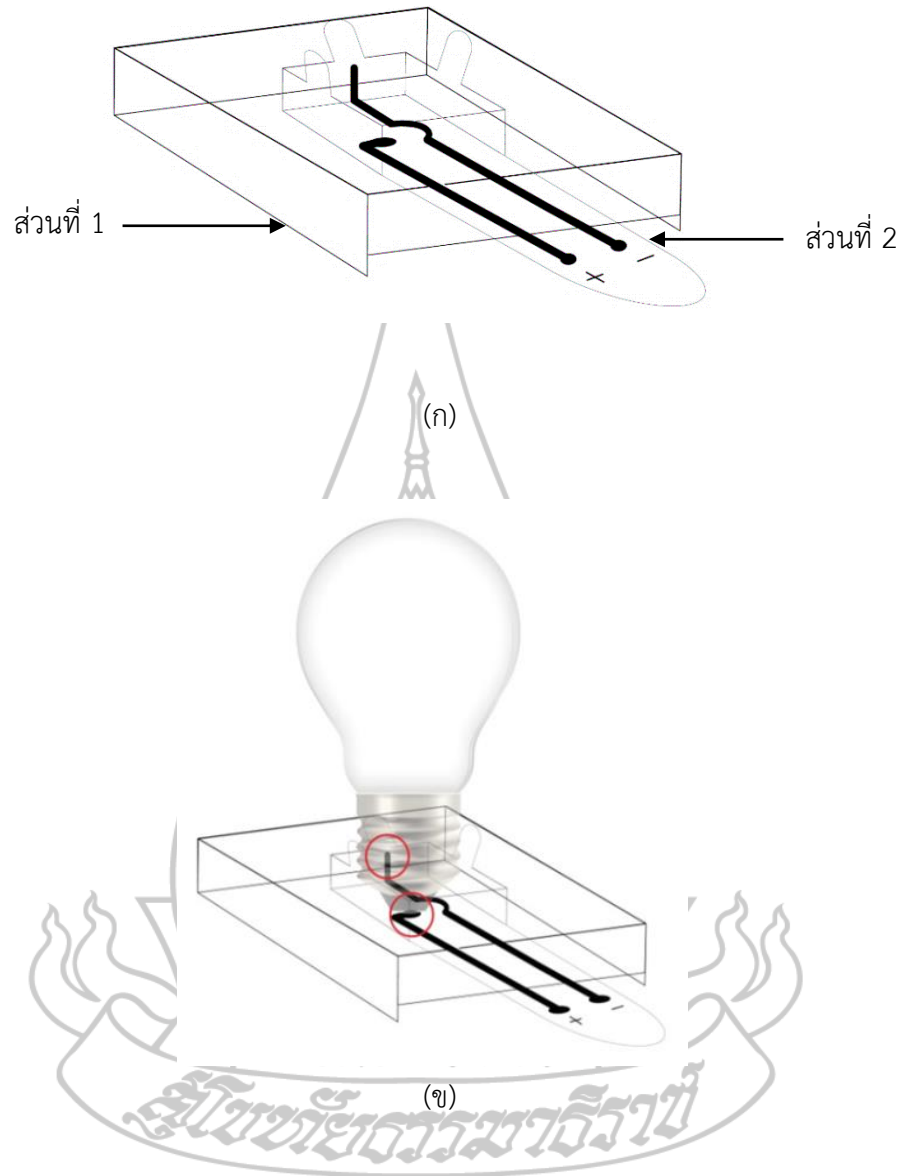
ภาพที่ 4.22 ลายเส้นวงจรนำไฟฟ้าในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2

(ก) แผ่นคลี่ที่พิมพ์ลายเส้นวงจรนำไฟฟ้า

(ข) ภาพจำลองขึ้นรูปที่พิมพ์ลายเส้นวงจรนำไฟฟ้า

4.4 การทดสอบหลอดไฟฟ้าที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์

การทดสอบหลอดไฟฟ้าในบรรจุภัณฑ์ที่ออกแบบมีการประกอบโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 เข้าด้วยกัน เมื่อบรรจุหลอดไฟฟ้าในกล่องบรรจุภัณฑ์ ภาพลายเส้นวงจรนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในส่วนที่ 2 ช่วยให้หลอดไฟฟ้าครบวงจรได้ขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าทางส่วนนี้ โดยเส้นที่แสดงขั้วบวกต่อกับขั้วบวกของหลอดไฟฟ้า และเส้นที่แสดงขั้วลบต่อกับขั้วลบของหลอดไฟฟ้า ขณะที่ส่วนที่ 1 ทำหน้าที่ยึดส่วนที่ 2 และประคองหลอดไฟฟ้าให้วางตั้งในกล่องบรรจุภัณฑ์ขณะที่ทำการทดสอบหลอดไฟฟ้า ภาพจำลองการทดสอบหลอดไฟฟ้าโดยใช้เส้นทางวงจรนำไฟฟ้าในโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 แสดงในภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 การทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าโดยใช้โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์

(ก) การประกอบโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2

(ข) ภาพจำลองเส้นทางวงจรรนำไฟฟ้าสำหรับทดสอบหลอดไฟในบรรจุภัณฑ์

เมื่อนำโครงสร้างภายในของบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วน มาบรรจุในกล่องบรรจุภัณฑ์ภายนอก เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า ขณะที่หลอดไฟยังอยู่ในบรรจุภัณฑ์ แสดงได้ดังภาพจำลองที่สร้างขึ้นในโปรแกรม IC3D ในภาพที่ 4.24

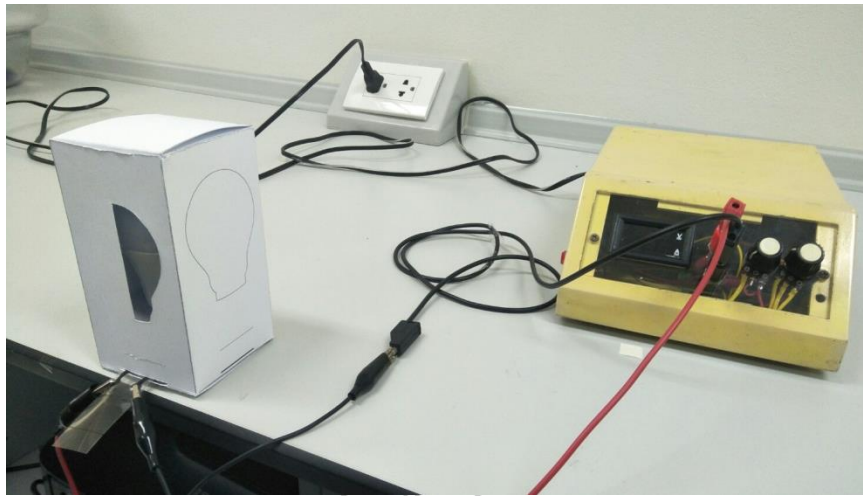


ภาพที่ 4.24 ภาพจำลองการประกอบโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์กับกล่องบรรจุภัณฑ์ภายนอก
เพื่อใช้ทดสอบการทำงานหลอดไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม IC3D

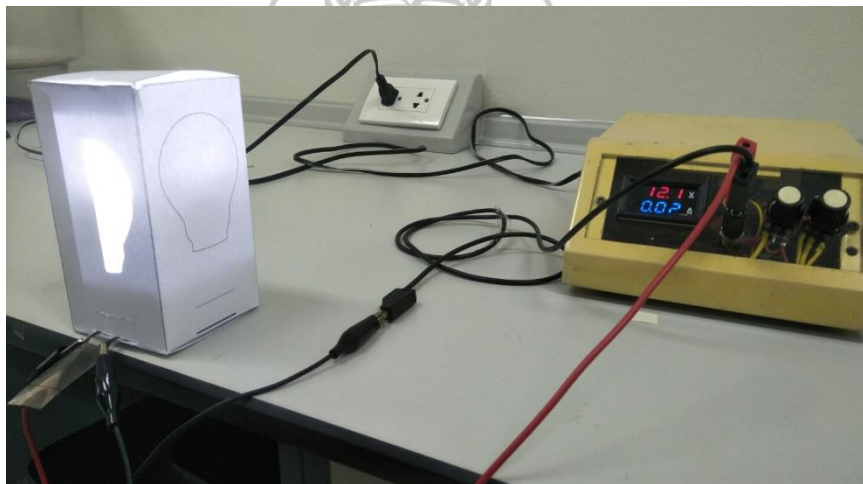
จากนั้นได้ทำต้นแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ตามโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ภายในและ
ภายนอกที่ออกแบบไว้ เพื่อนำมาใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า ซึ่งใช้หลอดไฟฟ้าชนิด LED
ความต่างศักย์ ไฟฟ้า 12 โวลต์ ชนิดกระแสตรง (DC 12V) กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ ดังแสดงในภาพที่
4.25 โดยต่อหลอดไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พบว่า หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่พิมพ์เป็นวงจ
นำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุอยู่ในกล่องบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า
เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่าน หมึกพิมพ์สามารถนำไฟฟ้าและทำให้หลอดไฟฟ้าที่ยังคงอยู่ในบรรจุ
ภัณฑ์สามารถส่องสว่างได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.25 ต้นแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ภายในกล่องบรรจุภัณฑ์เพื่อใช้ทดสอบหลอดไฟฟ้า



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.26 ภาพถ่ายแสดงการทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุในต้นแบบบรรจุภัณฑ์
หลอดไฟฟ้า

(ก) ก่อน เปิดสวิตซ์แหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า

(ข) หลัง เปิดสวิตซ์แหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สารนำไฟฟ้า PEDOT:PSS และหาสัดส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบต่าง ๆ ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้ PEDOT:PSS เป็นสารนำไฟฟ้า เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า สรุปผลของการทำวิจัย อภิปรายผล และมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้พอลิเมอร์ PEDOT:PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Poly(styrenesulfonate)) เป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในหมึกพิมพ์ องค์ประกอบอื่นในหมึกพิมพ์ได้แก่ สาร DMSO (Dimethyl Sulfoxide) เป็นตัวทำละลาย สาร EG (Ethylene Glycol) เป็นสารป้องกันการแข็งตัวและปรับความหนืดของหมึกพิมพ์ และสาร Triton x-100 เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้า และทำการทดลองโดยการผสมส่วนประกอบหมึกพิมพ์ให้มีสัดส่วนที่ต่างกัน 10 สัดส่วน ซึ่งแปรเปลี่ยนสัดส่วนระหว่าง PEDOT:PSS กับ DMSO แต่คงสัดส่วนของ EG และ Triton x-100 เท่ากัน จากนั้นนำมาพิมพ์บนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate : PET) ด้วยการพิมพ์พ่นหมึก โดยพื้นที่ภาพพิมพ์มีขนาด 1 เซนติเมตร x 0.8 เซนติเมตร

ในการทดลองเบื้องต้น พบว่า ความหนาชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีความสำคัญต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ ในการพิมพ์พ่นหมึกต้องพิมพ์ทับกัน 5 ชั้น โดยมีให้หมึกพิมพ์มีสมบัติสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยมีความหนาเฉลี่ยของชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เท่ากับ 441.7 นาโนเมตร

การวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ได้ทำการทดลองโดยผสมสัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่แตกต่างกันและนำไปพิมพ์บนแผ่นพลาสติก PET นั้น เมื่อนำไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าทุกวินาที เป็นเวลา 300 วินาที และนำค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยมาคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าในสัดส่วนที่มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด พบว่า ปริมาณสัดส่วน PEDOT:PSS เพิ่มขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้านั้นจะลดลง หรือค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จนถึงสัดส่วนของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด หรือค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PEDOT:PSS สูงขึ้นกว่าสัดส่วนนี้ ปรากฏว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากลับสูงขึ้น หรือสภาพนำไฟฟ้าลดลง จึงสรุปได้ว่า สัดส่วน ของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า คือ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 เท่ากับ 75 : 20 : 4 : 1

ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าด้านแบบ เพื่อประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าในการทดสอบหลอดไฟฟ้่าที่บรรจุอยู่ภายใน ได้ทำการออกแบบโครงสร้างภายในของบรรจุภัณฑ์โดยเพิ่มชิ้นส่วนโครงสร้างภายในจำนวน 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ใช้เป็นส่วนยึดขั้วหลอดไฟฟ้่า ป้องกันการกระแทกของหลอดไฟฟ้่าขณะขนส่ง และส่วนที่ 2 เป็นชิ้นส่วนสำหรับการทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้่า โดยออกแบบลายเส้นวงจรนำไฟฟ้่าที่สามารถเชื่อมต่อขั้วบวกและขั้วลบของหลอดไฟฟ้่า และพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้่าในสัดส่วนที่ให้สภาพนำไฟฟ้่าได้สูงสุด โดยโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์ทั้งสองส่วนนี้ได้ใช้แผ่นพลาสติก PET เป็นวัสดุ ส่วนโครงสร้างภายนอกบรรจุภัณฑ์เป็นกล่องกระดาษพับได้แบบฝาสอด (Tuck end box) โดยเป็นกล่องแบบฝาด้านบนและฝาด้านล่างสลับด้านกันแบบกล่องเอสอาร์ที (Standard Reverse Tuck; SRT) เพื่อให้สามารถดึงชิ้นส่วนภายในกล่องส่วนที่ 2 ออกมาทดสอบกับระบบจ่ายไฟฟ้่าได้ และมีการเจาะช่องหน้าต่างกล่องบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้สามารถมองเห็นการเปล่งแสงของหลอดไฟฟ้่าขณะทำการทดสอบได้ชัดเจน เมื่อบรรจุหลอดไฟฟ้่าชนิด LED ความต่างศักย์ ไฟฟ้่า 12 โวลต์ กำลังไฟฟ้่า 9 วัตต์ ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้่าด้านแบบ และทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้่า โดยต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้่ากระแสตรง พบว่า หลอดไฟฟ้่าเปล่งแสงได้ โดยไม่ต้องนำหลอดไฟฟ้่าออกจากบรรจุภัณฑ์

5.2 อภิปรายผล

สาร PEDOT:PSS เป็นสารประกอบของพอลิเมอร์ 2 สาร คือ PEDOT หรือสารพอลิ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอเฟน (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) และ PSS หรือพอลิสไตรีนซัลโฟเนต (Poly(styrenesulfonate)) ซึ่งมีสมบัตินำไฟฟ้่าได้ แม้จะนำไฟฟ้่าได้ไม่สูงเท่าสารนำไฟฟ้่าประเภทสารประกอบโลหะ เช่น ซิลเวอร์ ทองแดง คาร์บอนนาโน กราฟีน แต่มีราคาถูกกว่า ในการวิจัยจึงนำมาใช้เป็นสารนำไฟฟ้่าในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้่า โดยวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้พิมพ์เป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้่า โดยผลการทดลองได้พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมคือ PEDOT:PSS ที่สัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 เท่ากับ 75 : 20 : 4 : 1 ให้สภาพต้านทานไฟฟ้่าต่ำสุด หรือมีสภาพนำไฟฟ้่าได้สูงสุด แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PEDOT:PSS เพิ่มขึ้นอีก กลับพบว่า หมึกพิมพ์มีความสามารถนำไฟฟ้่าได้ลดลง และเมื่อศึกษาอนุภาคภายในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้่าเปรียบเทียบกับหมึกพิมพ์ที่มีสัดส่วนที่เหมาะสมคือ สัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100

เท่ากับ 75 : 20 : 4 : 1 กับสัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 เท่ากับ 80 : 15 : 4 : 1 ที่นำไฟฟ้าได้ลดลง พบว่า หมึกพิมพ์ที่มีสัดส่วนของ PEDOT:PSS เหมาะสม คือ ร้อยละ 75 มีขนาดเกรนเล็กสม่ำเสมอประมาณ 26 - 75 นาโนเมตร ขณะที่หมึกพิมพ์ที่มีสัดส่วนของ PEDOT:PSS เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 75 มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นและไม่สม่ำเสมอประมาณ 100 - 300 นาโนเมตร

จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงว่า ความสามารถนำไฟฟ้าของสาร PEDOT:PSS ที่ใช้เป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า นอกจากจะขึ้นกับปริมาณของ PEDOT:PSS แล้ว ยังต้องมีตัวทำละลายในงานวิจัยนี้ คือ DMSO ในสัดส่วนที่เหมาะสมด้วย ด้วย PEDOT:PSS มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี (p-type semiconductor) โดยพันธะระหว่างโครงสร้าง PEDOT กับโครงสร้าง PSS เป็นโฮล (Hole) ที่ให้เสมือนอนุภาคประจุบวกผ่านได้ ทำให้เกิดพาหะนำไฟฟ้าได้ การเกิดโฮลระหว่าง PEDOT กับ PSS ที่เหมาะสมให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี ต้องมีปริมาณตัวทำละลาย ในที่นี้คือ สาร DMSO ที่พอดี คือ ภาวะไม่พร่อง (No Depletion) ของตัวทำละลาย เพื่อให้มีการกระจายตัวของ PEDOT:PSS ที่ดี ในภาวะที่หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีการพร่องของตัวทำละลายหรือ DMSO หรือมีปริมาณตัวทำละลายน้อยเกินไป ทำให้โมเลกุลของ PEDOT และ PSS อยู่ชิดติดกัน เกิดเกรนขนาดใหญ่ การเกิดโฮลที่เป็นพาหะนำไฟฟ้าลดลง ในกรณีนี้ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ไม่ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fan และคณะ (2019)

จากการนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่สัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 เท่ากับ 75 : 20 : 4 : 1 ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ดีที่สุดไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า โดยนำไปพิมพ์บนแผ่นพลาสติก PET ด้วยการพิมพ์ระบบพ่นหมึก และได้ออกแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ต้นแบบให้มีโครงสร้างภายนอก และโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์ที่เอื้อต่อการทดสอบหลอดไฟฟ้า ในการทดลองได้ใช้หลอดไฟฟ้าชนิด LED ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ ผลการทดลองสรุปได้ว่า หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT สามารถนำไปใช้กับบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องนำออกจากบรรจุภัณฑ์ได้ ซึ่งการพัฒนาบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าต้นแบบในงานวิจัยครั้งนี้สอดคล้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Intelligent Packaging) ที่เป็นแนวโน้มบรรจุภัณฑ์ในอนาคตที่ให้บรรจุภัณฑ์มีความสามารถพิเศษมากกว่าหน้าที่หลักของบรรจุภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วย การปกป้องสินค้า การสื่อสารข้อมูลไปยังผู้บริโภค และการอำนวยความสะดวกแก่ผู้บริโภค แนวคิดของบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Kit L. Yam, Paul T. Takhistov, and Joseph Mil. TZ, 2005) เป็นระบบบรรจุภัณฑ์ที่สามารถทำหน้าที่อัจฉริยะได้ เช่น การบ่งบอกสถานะสินค้า การติดตามข้อมูลสินค้า การสื่อสารข้อมูลสินค้า เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจซื้อสินค้าของผู้บริโภค เอกลักษณ์เฉพาะของบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะจึงอยู่ที่ความสามารถของบรรจุภัณฑ์ที่จะติดตามผลิตภัณฑ์ สื่อสารสถานะและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุตลอดวงจรห่วงโซ่อุปทานได้ จากแนวคิดดังกล่าว จะเห็นได้ว่า บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าต้นแบบที่มีการประยุกต์ใช้

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเพื่อทดสอบคุณภาพหลอดไฟฟ้าที่บรรจุ จึงเป็นการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะที่เป็นแนวโน้มใหม่ของบรรจุภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ ประโยชน์ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สามารถนำไปประยุกต์ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้อีก เช่น ทรานซิสเตอร์ จอแสดงผล เซ็นเซอร์ วัดความดัน อุณหภูมิ และตรวจจับโมเลกุลแก๊สต่าง ๆ ได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

การพัฒนาารูปแบบบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่มีการประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มาพิมพ์เป็นแผงวงจรไฟฟ้าหรือเซ็นเซอร์ที่สามารถตรวจสอบความสามารถของหลอดไฟฟ้าที่บรรจุได้

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

5.3.2.1 การศึกษาระยะเวลาที่หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าบนบรรจุภัณฑ์สามารถคงสภาพนำไฟฟ้าได้ระหว่างเก็บไว้ในคลังสินค้า

5.3.2.2 การศึกษาระบบการพิมพ์และวิธีการพิมพ์ที่ให้ความหนาของชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ

5.3.2.3 การศึกษาเปรียบเทียบสารนำไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ หรือใช้สารนำไฟฟ้าหลายประเภทผสมกัน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะสำหรับผลิตภัณฑ์อื่น เพื่อสื่อสารข้อมูล หรือตรวจสอบสถานะผลิตภัณฑ์ ซึ่งจำเป็นต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค

บรรณานุกรม

- ณรงค์ สัจวาระนนที. 2562. *การวัดและตรวจสอบชนิดของพาหะข้างมาก*. ใน นภดล แซ่มซ้อย (บ.ก.), โสฬิตเสตทอเล็กทรอนิกส์. (น.93). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
- มานิตย์ กมลสุวรรณ. และ ผกามาศ ผขญแกลั่ว. (2558). เทคโนโลยีการแปรรูปกล่องกระดาษแข็ง ในเอกสารชุดวิชาเทคโนโลยีแปรรูปบรรจุภัณฑ์. หน่วยที่ 3 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช :นนทบุรี
- สุภาวดี อีธรรมากร. (2558). *การออกแบบกล่อง*. ในเอกสารการสอนชุดวิชาการออกแบบทางการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ หน่วยที่ 9. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช :นนทบุรี
- อรณิศ ปันยารชุน. (2558). *ความรู้ทั่วไปในการออกแบบบรรจุภัณฑ์*. ในเอกสารการสอนชุดวิชาการออกแบบทางการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ หน่วยที่ 8. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช :นนทบุรี
- Andò, B., Baglio, S., Pasquale, G. D., Pollicino, A., D'Agata, S., Gugliuzzo, C., . . . Re, G. (2015). An Inkjet Printed CO₂ Gas Sensor. *Science Direct*. 120: 628-631.
doi:10.1016/j.proeng.2015.08.755.
- Arbab, A. A., Memon, A. A., Sun, K. C., Choi, J. Y., Mengal, N., Sahito, I. A. & Jeong. S. H. (2019). Fabrication of conductive and printable nano carbon ink for Wearable electronic and heating Fabrics. *Journal of Colloid and Interface Science*. 539: 95-106.doi:10.1016/j.jcis.2018.12.050.
- Dunst, K., Karczewski, J. & Jasiński, P. (2017). Nitrogen dioxide sensing properties of PEDOT Polymer Films. *Sensors and Actuators B-Chemical*. 247: 108-113.
doi:10.1016/j.snb.2017.03.003.
- Fan, X., Nie, W., Tsai, H., Wang, N., Huang, H., Cheng, Y., . . . Xia, Y. (2019). PEDOT:PSS For Flexible and Stretchable Electronics: Modifications, Strategies, and Applications. *Advanced Science*. 6(19): 1900813.
doi:10.1002/advs.201900813.

บรรณานุกรม (ต่อ)

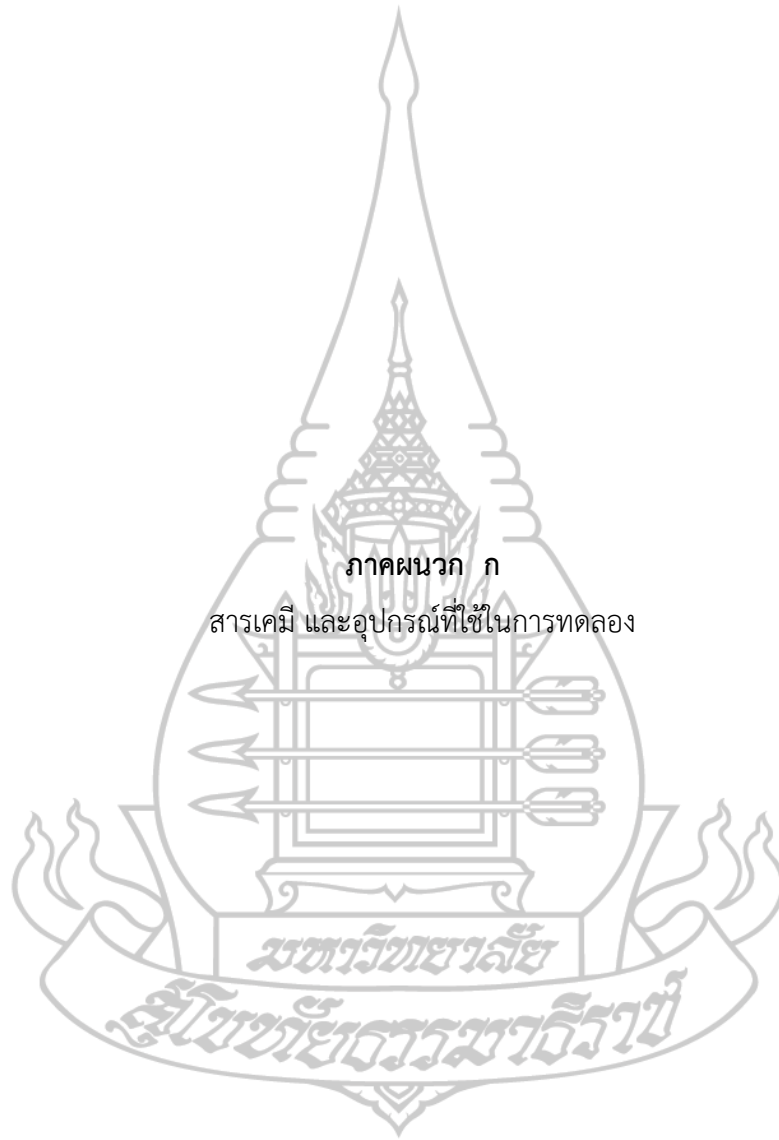
- Han, J., Kim, B., Li, J. & Meyyappan, M. (2014). Carbon nanotube ink for writing on Cellulose paper. *Materials Research Bulletin*. 50: 249-253. doi:10.1016/j.materresbull.2013.10.048.
- Jang, D., Kim, D. & Moon, J. (2009). Influence of fluid physical properties on inkjet printability. *American Chemical Society*. 25(5): 2629-2635. doi:10.1021/la900059m.
- Kastner, J., Faury, T., Außerhuber, H. M., Obermüller, T., Leichtfried, H., Haslinger, M. J., . . . Lederer, T. (2017). Silver-based reactive ink for inkjet-printing of conductive lines. *Microelectronic Engineering*. 176: 84-88. doi:10.1016/j.mee.2017.02.004.
- Khasim, S., Pasha, A., Badi, N., Ltaief, A., Al-Ghamdi, S. A. & Panneerselvam, C. (2021). Design and development of highly sensitive PEDOT-PSS/AuNP hybrid nanocomposite-based sensor towards room temperature detection of greenhouse methane gas at ppb level. *Royal Society of Chemistry*. 11: 15017-15029. doi:10.1039/d1ra00994j.
- Kit L. Yam, Paul T. Takhistov. And Joseph Miltz. (2005). Intelligent Packaging: Concepts and Applications. *Journal of Food Science*. 70(1): R1-R10.
- Liao, Y., Zhang, R. & Qian, J., (2019). Printed electronics based on inorganic conductive nanomaterials and their applications in intelligent food packaging. *Royal Society of Chemistry*. 9: 29154-29172. doi:10.1039/c9ra05954g.
- Li, W., Sun, Q., Li, L., Jiu, J., Liu, X., Kanehara, M. (2019). The rise of conductive copper inks: challenges and perspectives. *Applied Materials Today*. 18: 100451 doi:10.1016/j.apmt.2019.100451.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Pali, L. S., Jindal, R. & Garg, A. (2018). Screen printed PEDOT:PSS films as transparent electrode and its application in organic solar cells on opaque substrates. *Journal of Materials in Electronics* 29(13):
- Seekaew, Y., Lokavee, S., Phokharatkul, D., Wisitsoraat, A., Kerdcharoen, T. & Wongchoosuk, C. (2014). Low-cost and flexible printed graphene-PEDOT:PSS gas sensor for ammonia detection. *Organic Electronics*. 15: 2971-2981. doi:10.1016/j.orgel.2014.08.044.
- Sinha, S. K., Noh, Y., Reljin, N., Treich, G. M., Mohammadalipour, S. H., Guo, Y., . . . Sotzing, G. A. (2017) Screen-printed PEDOT:PSS electrodes on commercial finished textiles for electrocardiography. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 9(43): 37524-37528. doi:10.1021/acsami.7b09954.
- Srichan, C., Saikrajang, T., Lomas, T., Jomphoak, A., Maturros, T., Phokaratkul, D., . . . Tuantranont, A. (2009). Inkjet printing PEDOT:PSS using desktop inkjet printer. 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, *Telecommunications and Information Technology*. 1: 10746697. doi:10.1109/ECTICON.2009.5137049.
- Wongchoosuk, C., Jangtawee, S., Udomrat, S., Sudkeaw, P. & Kerdcharoen, T. (2012). Novel flexible NH₃ gas sensor prepared by inkjet printing technique. *Advanced Materials Research*. 506: 39-42. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.506.39.
- Zhang, C., Kremer, M. P., Seral-Ascaso, A., Park, S. H., McEvoy, N., Anasori, B., . . . Nicolosi, V. (2018). Microelectronics: Stamping of flexible, coplanar micro-supercapacitors using MXene inks. *Advanced Functional Materials*. 28(9): 1870059. doi:10.1002/adfm.201705506.
- Zhang, Y., Wang, Y., Cheng, T., Yao, L., Li, X., Lai, W. & Huang, W. (2019). Printed supercapacitors: materials, printing and applications. *Royal Society of Chemistry*. n.d.: unpagged. doi:10.1039/c7cs00819h.



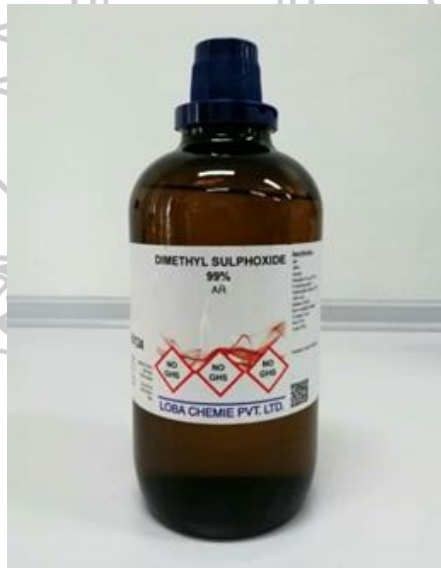
ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ก.1 พอลิเมอร์ PEDOT:PSS



ภาพที่ ก.2 Dimethyl Sulfoxide (DMSO)



ภาพที่ ก.3 Ethylene Glycol (EG)



ภาพที่ ก.4 Triton x-100



ภาพที่ ก.5 ไมโครปิเปต



ภาพที่ ก.6 เครื่องกวนสาร



ภาพที่ ก.7 เครื่องมัลติมิเตอร์



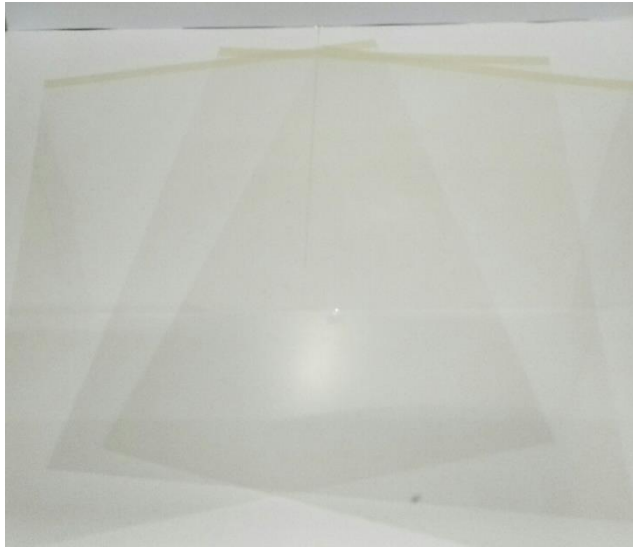
ภาพที่ ก.8 เครื่องล้างความถี่เหนือเสียง GT Ultrasonic Cleaner



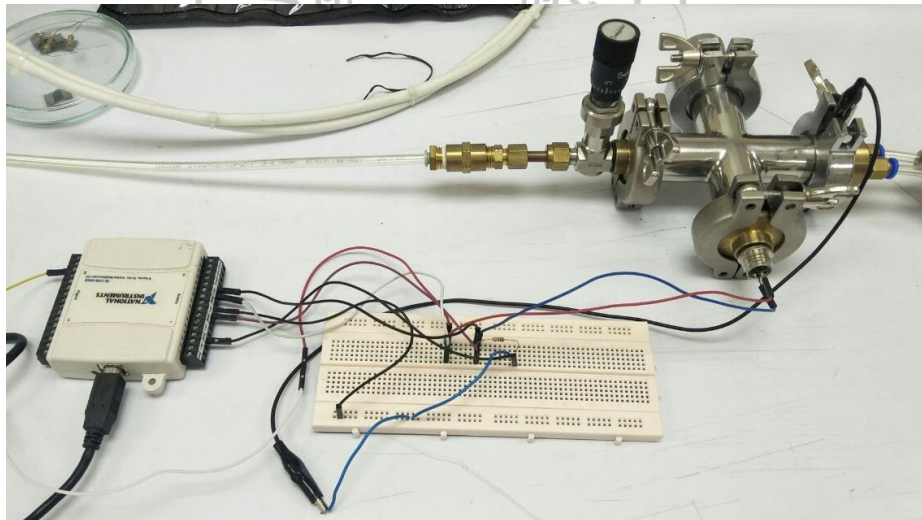
ภาพที่ ก.9 เครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Inkjet) ยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112



ภาพที่ ก.10 ตลับหมึกเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Inkjet) ยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112



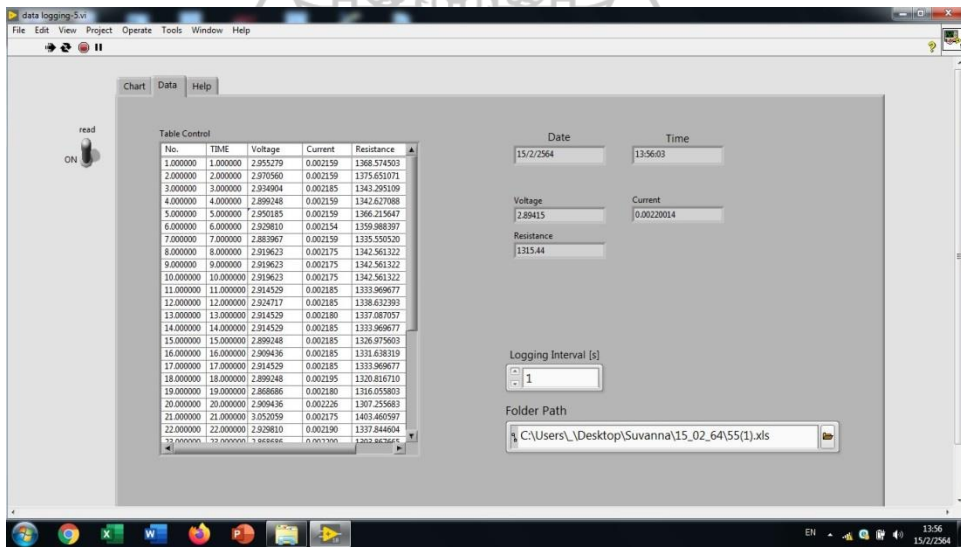
ภาพที่ ก.11 แผ่นพลาสติกประเภท PET



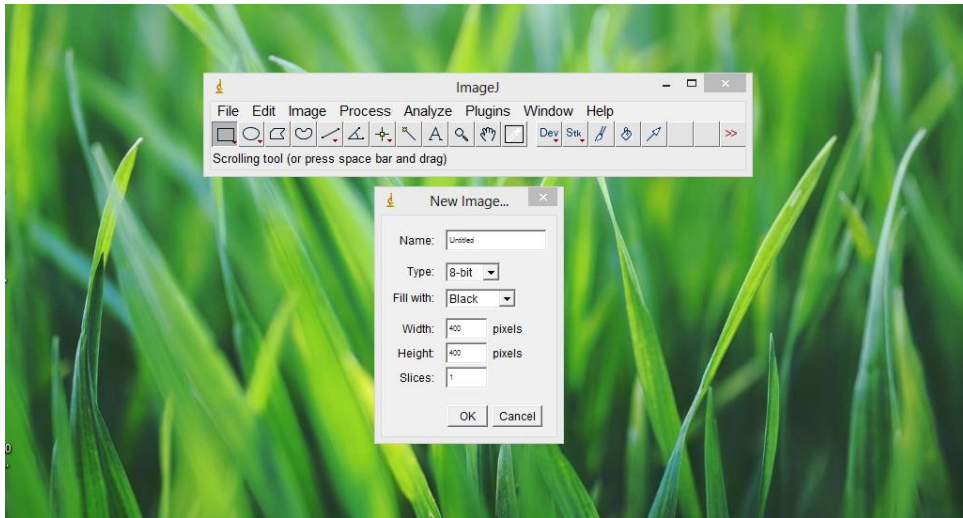
ภาพที่ ก.12 ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ ก.13 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

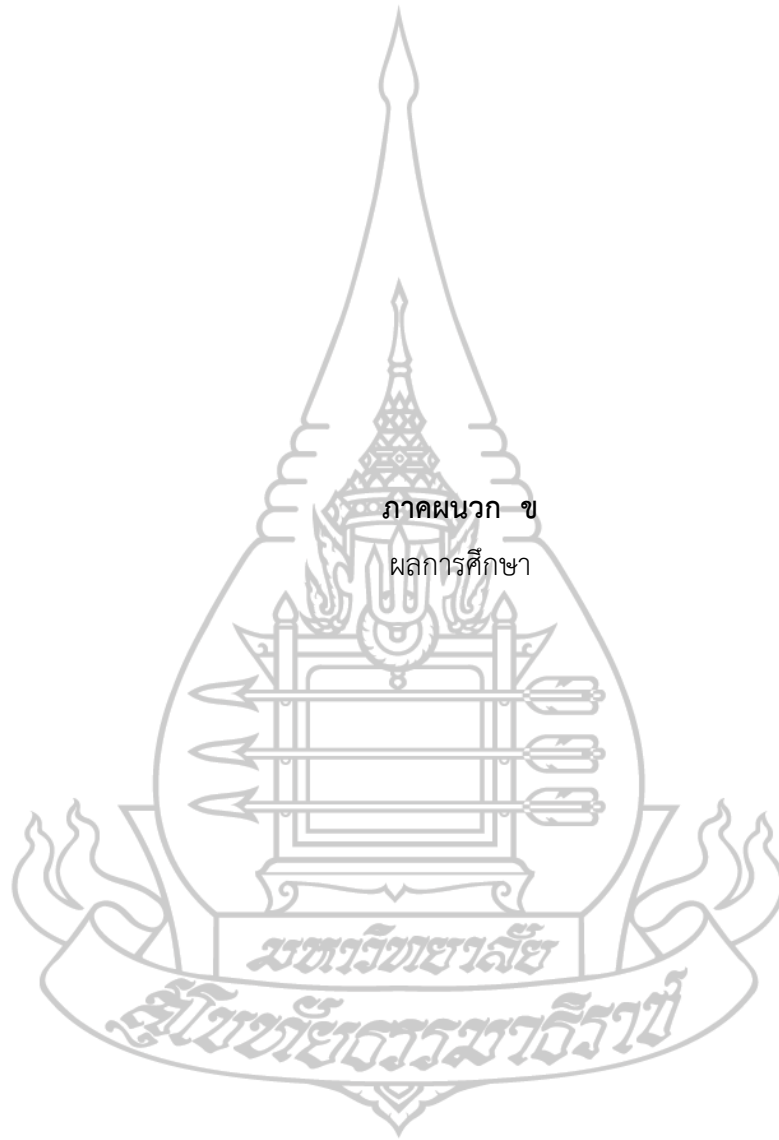


ภาพที่ ก.14 โปรแกรม LabVIEW 2018



ภาพที่ ก.15 โปรแกรม ImageJ



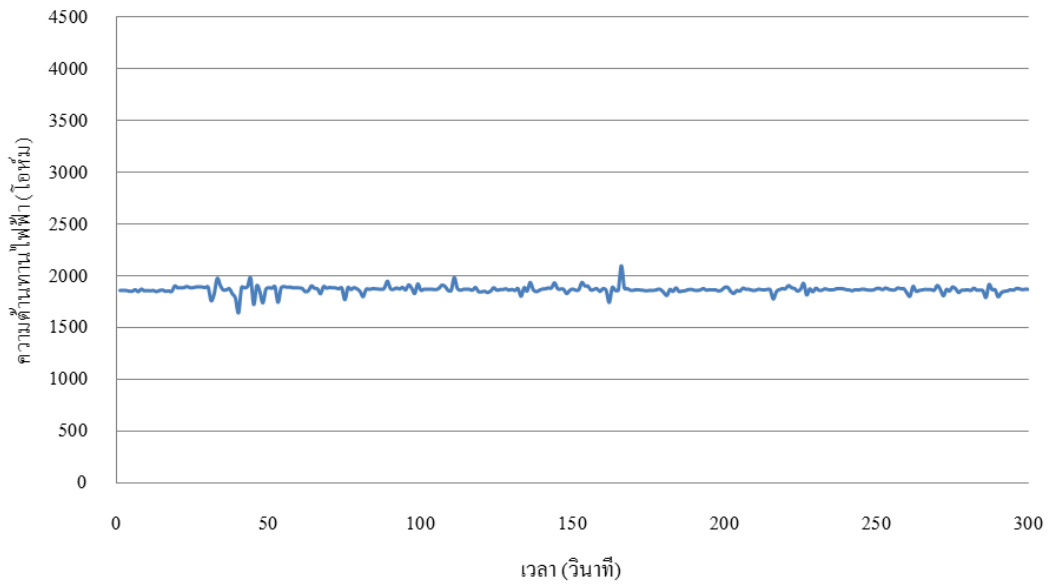


ภาคผนวก ข
ผลการศึกษา

มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์

มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์

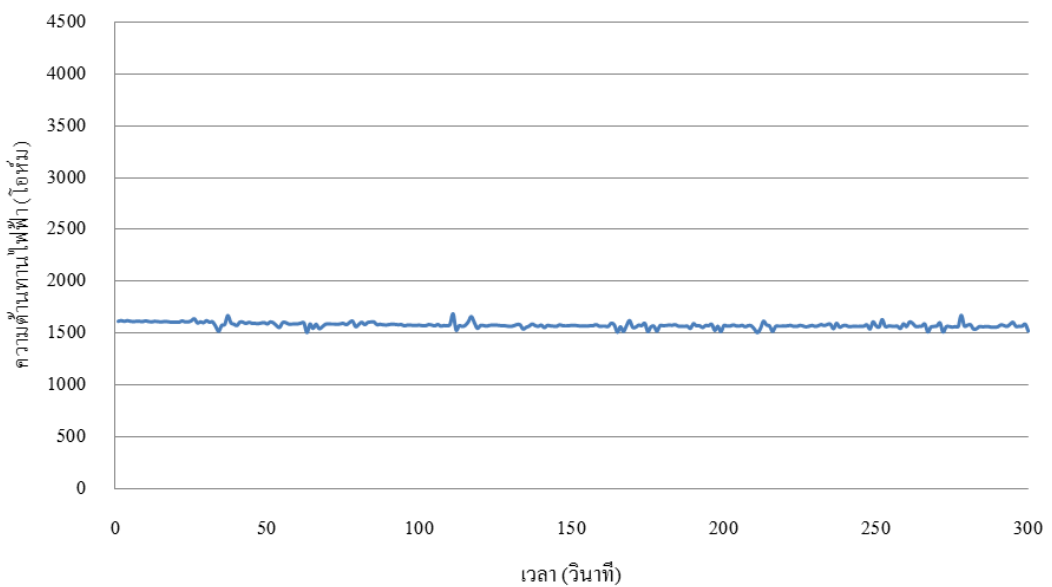
สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



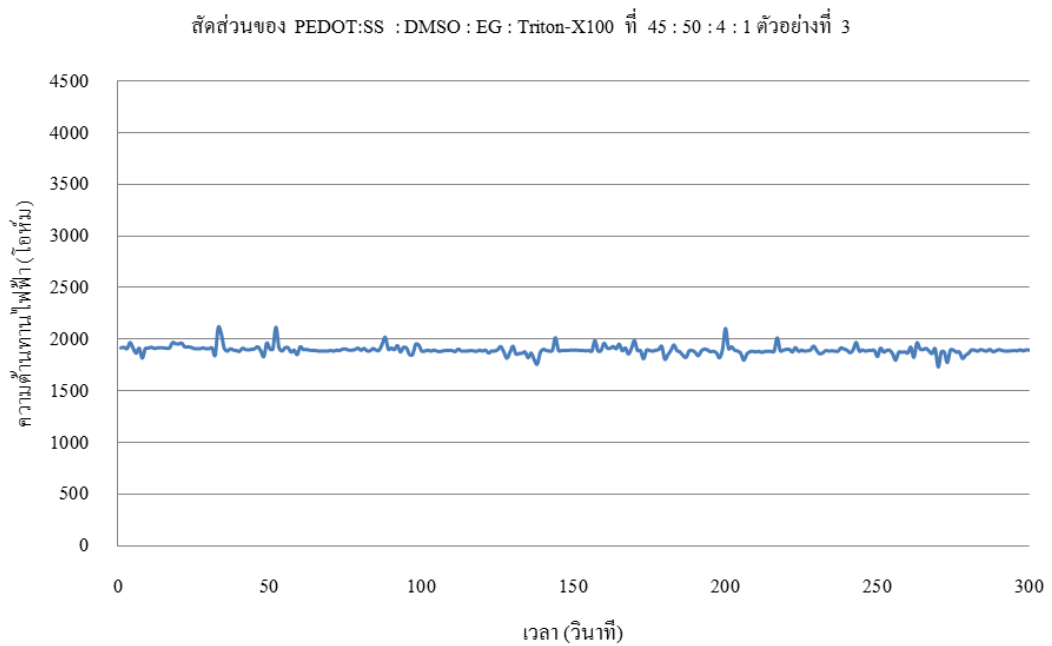
ภาพที่ ข.1 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



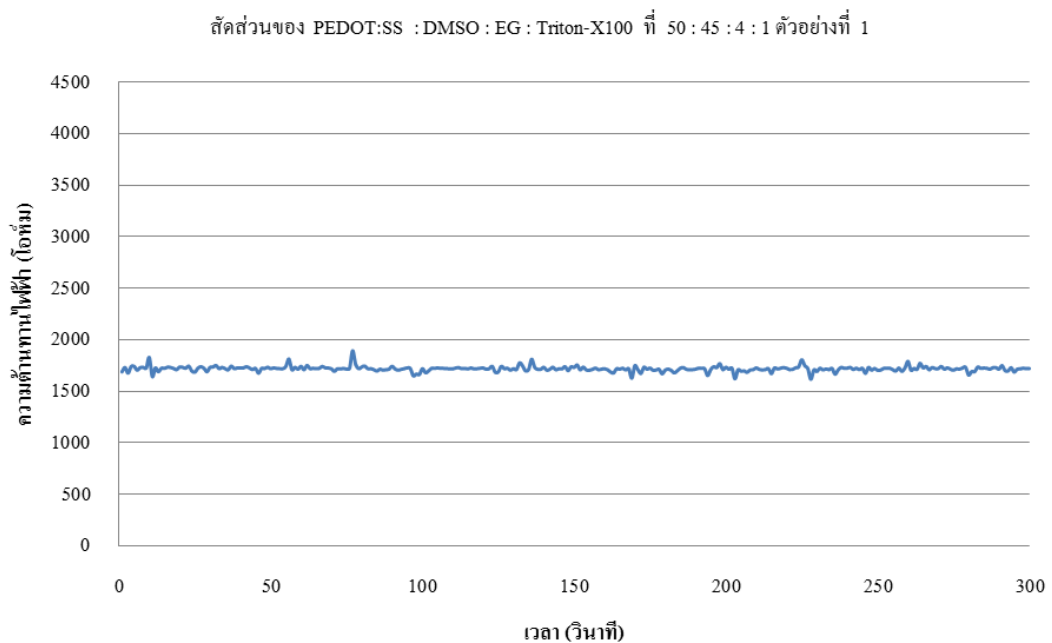
สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



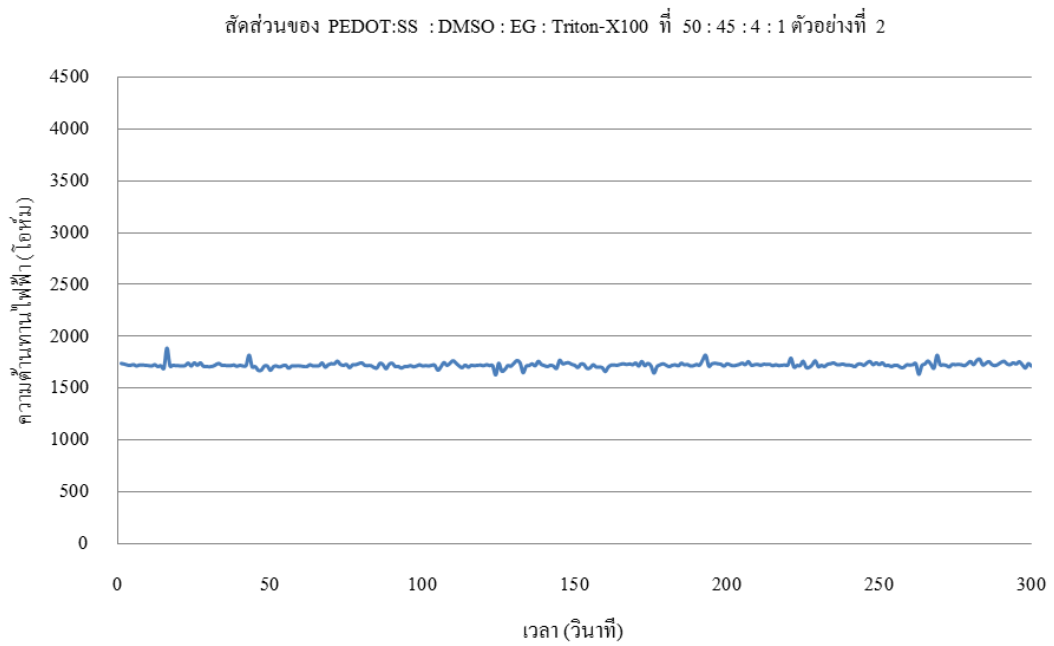
ภาพที่ ข.2 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



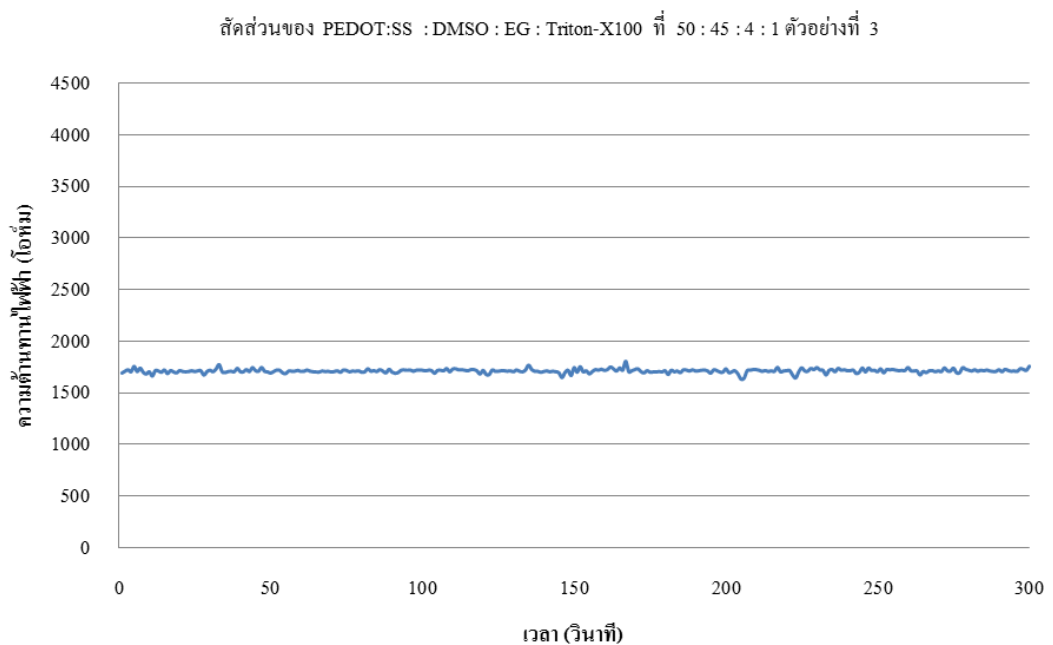
ภาพที่ ข.3 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 45 : 50 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ ข.4 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 50 : 45 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1

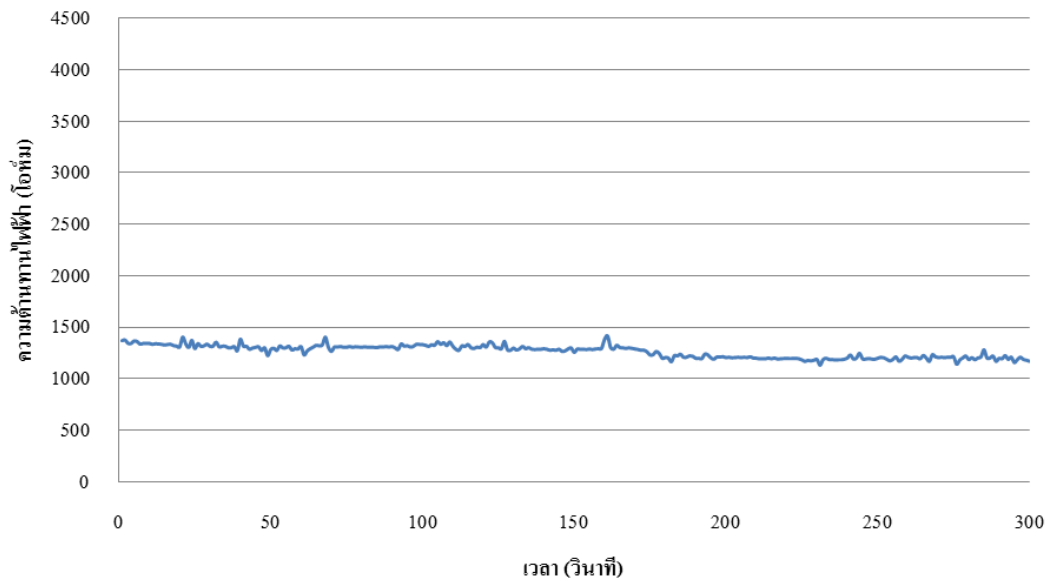


ภาพที่ ข.5 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 50 : 45 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



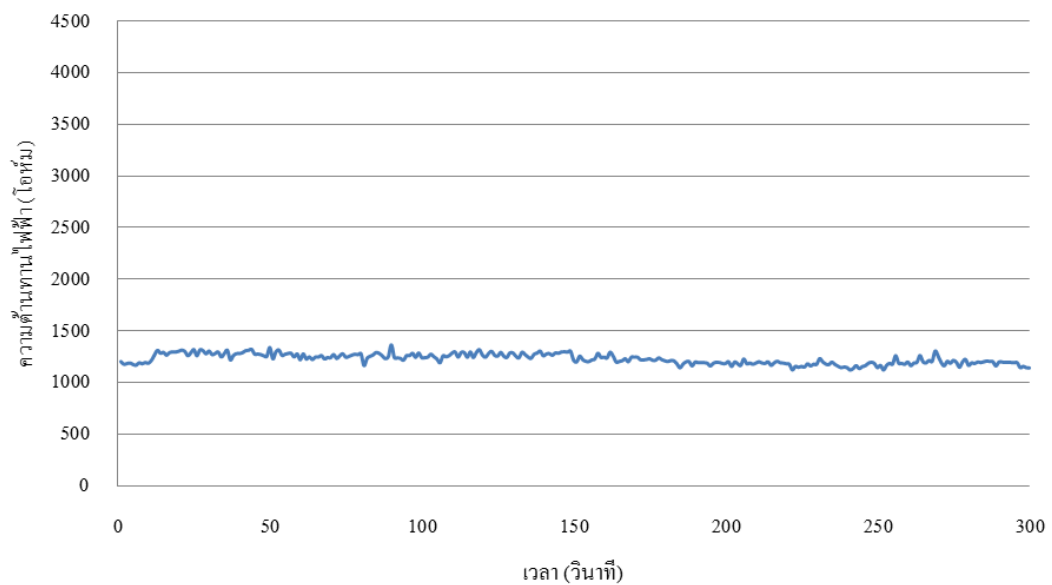
ภาพที่ ข.6 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 50 : 45 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

สัดส่วนของ PEDOT:SS :DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



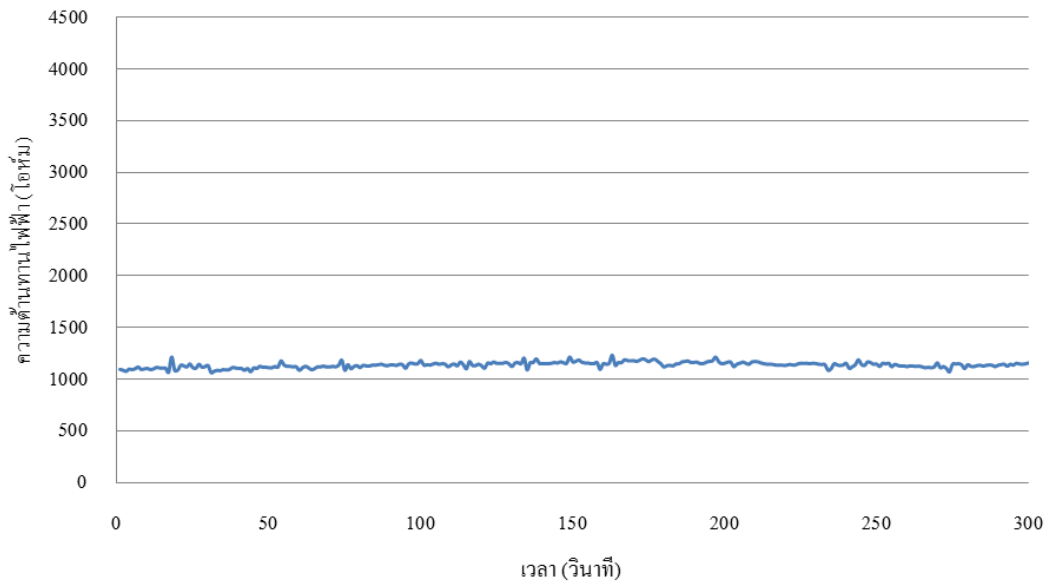
ภาพที่ ข.7 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1

สัดส่วนของ PEDOT:SS :DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



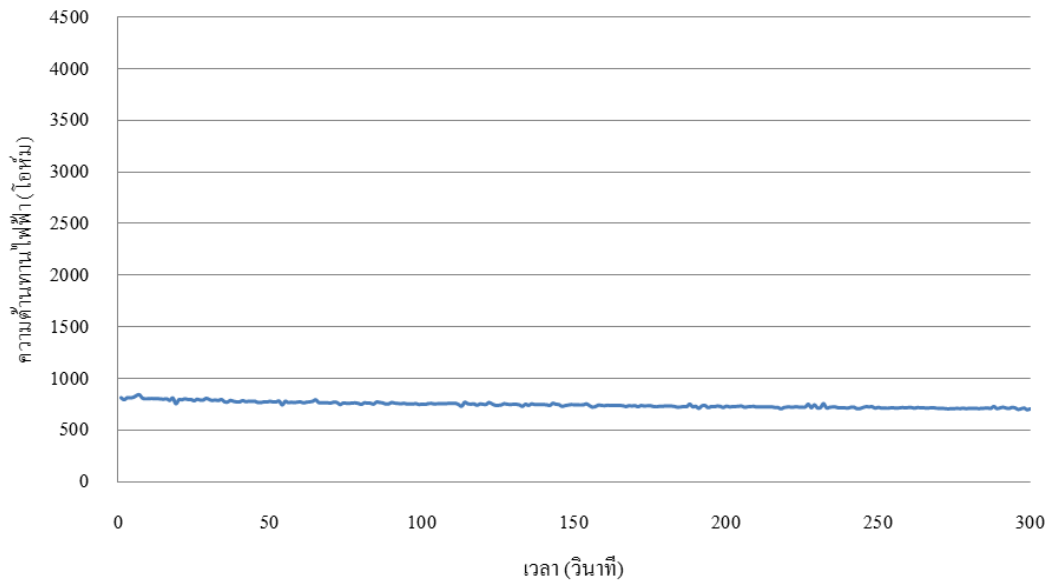
ภาพที่ ข.8 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



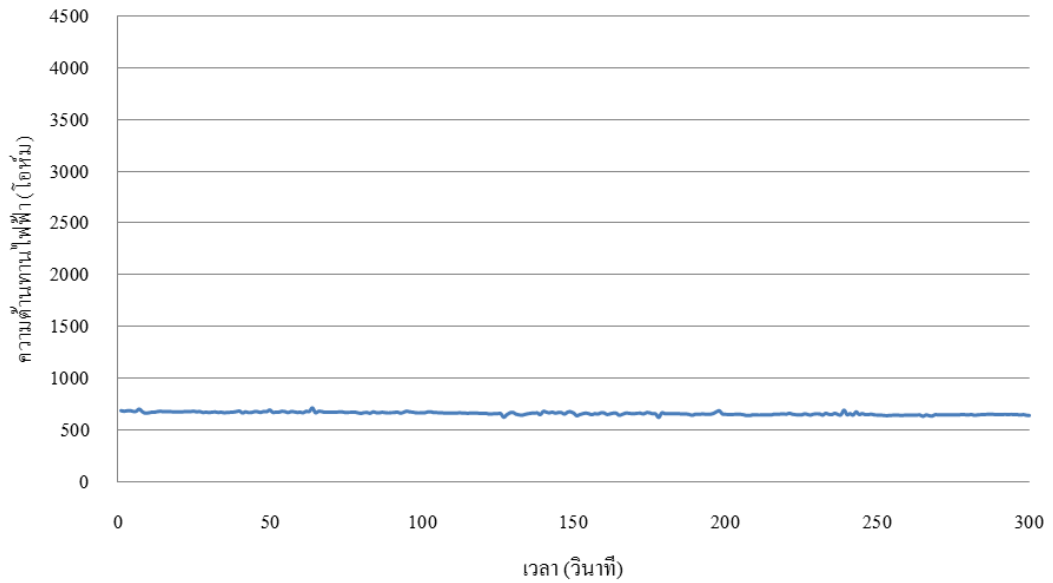
ภาพที่ ข.9 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 55 : 40 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



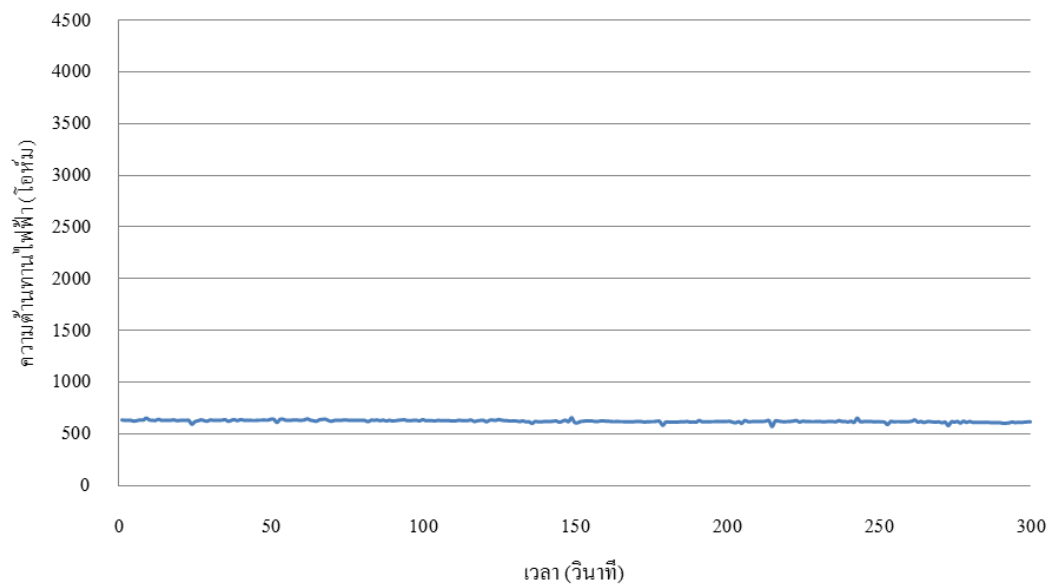
ภาพที่ ข.10 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



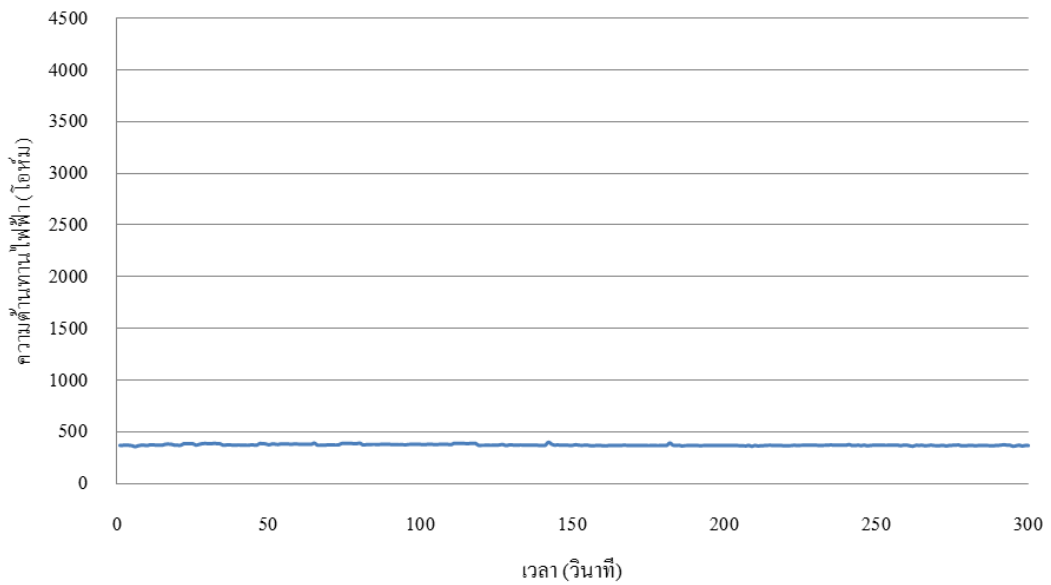
ภาพที่ ข.11 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



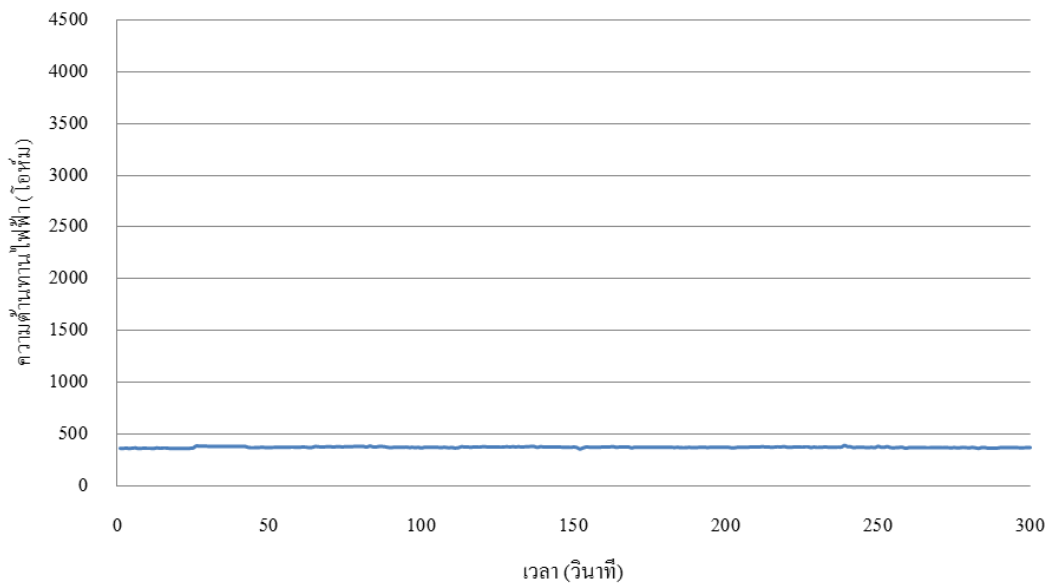
ภาพที่ ข.12 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 60 : 35 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



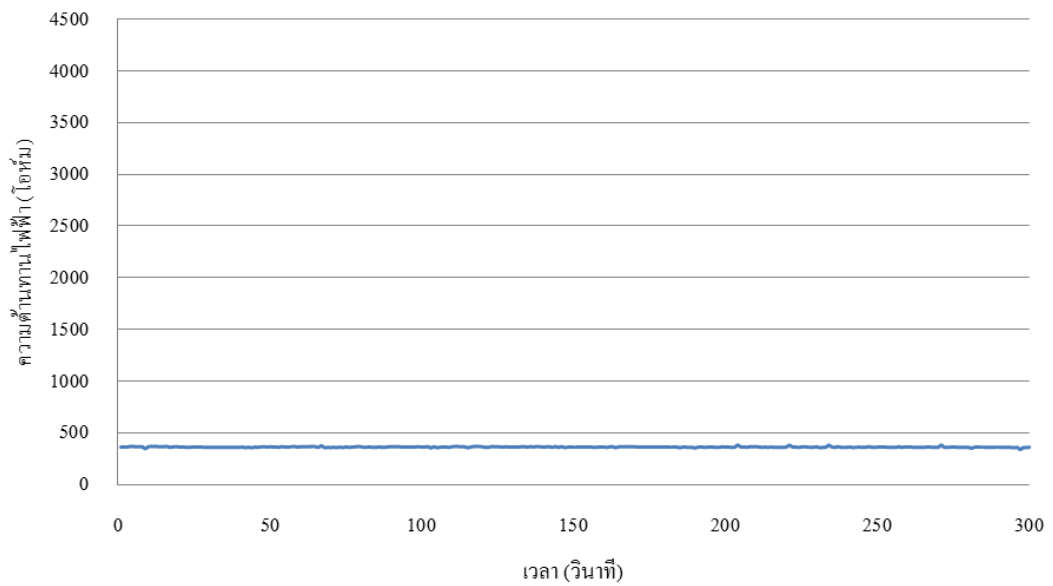
ภาพที่ ข.13 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ ข.14 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

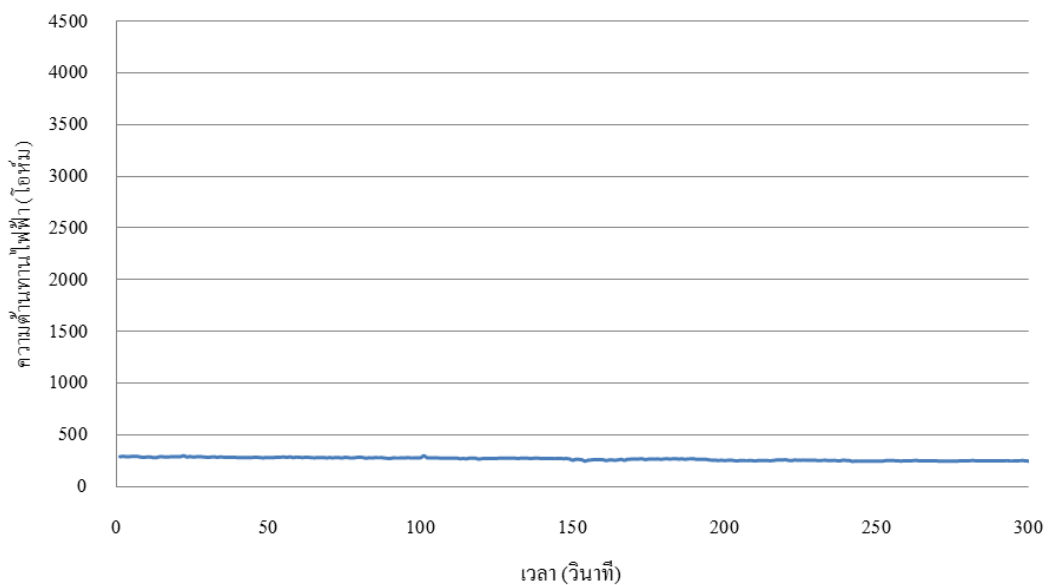
สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ ข.15 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 65 : 30 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

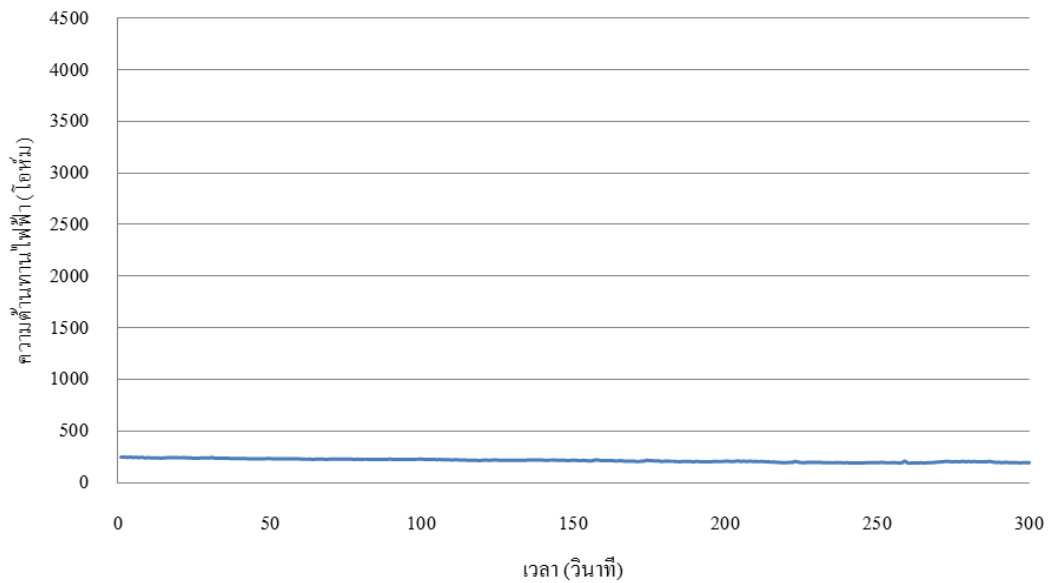


สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



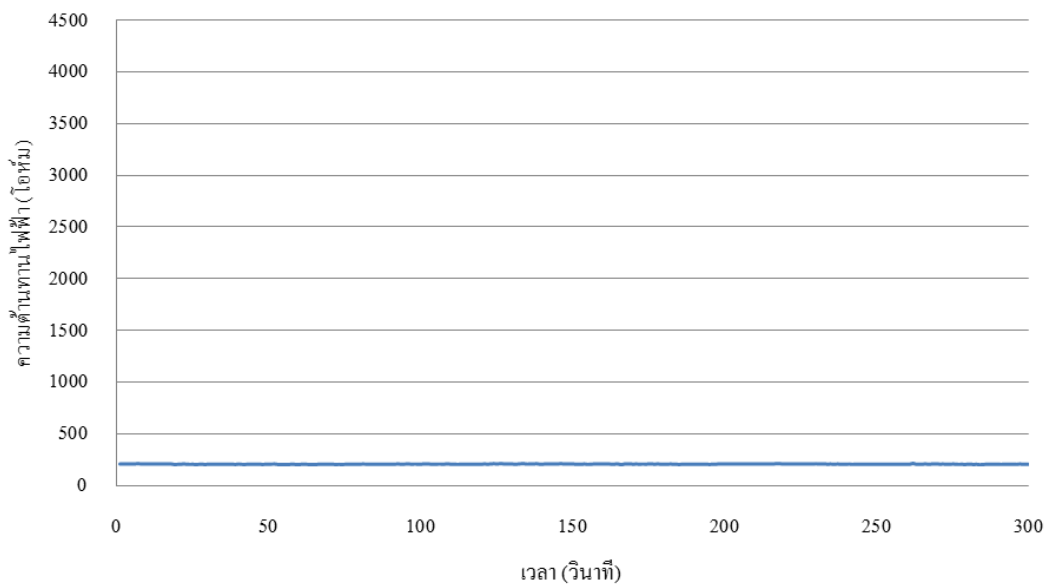
ภาพที่ ข.16 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

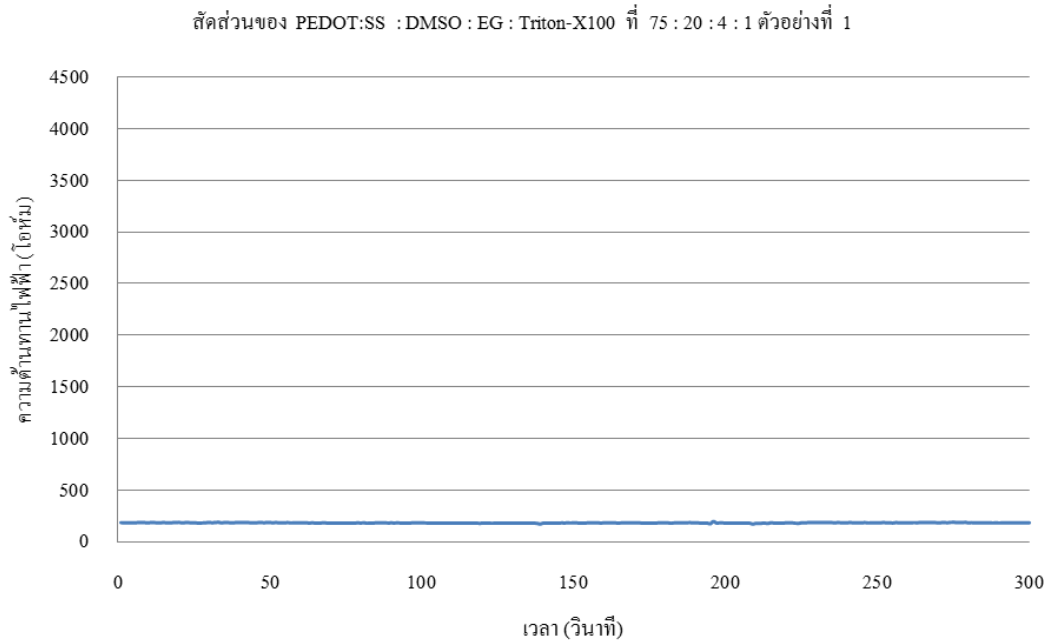


ภาพที่ ข.17 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

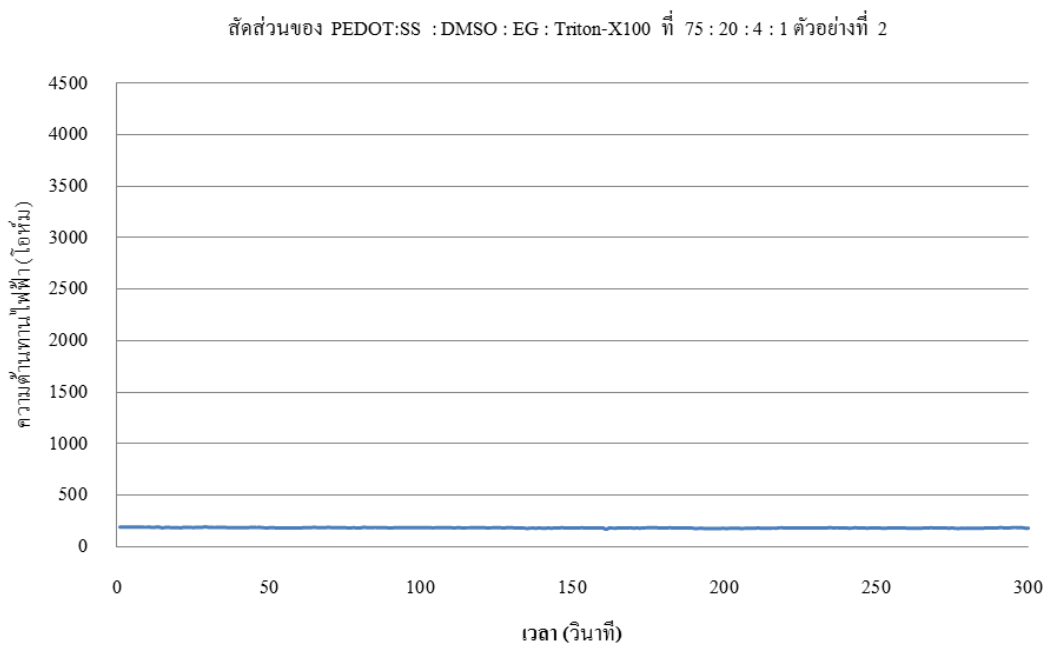
สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ ข.18 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 70 : 25 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

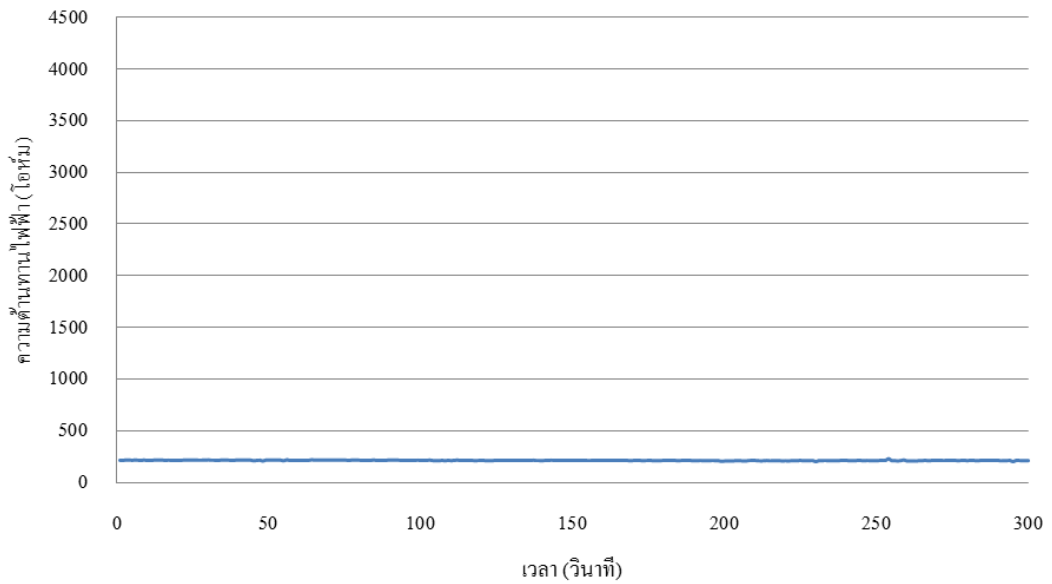


ภาพที่ ข.19 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



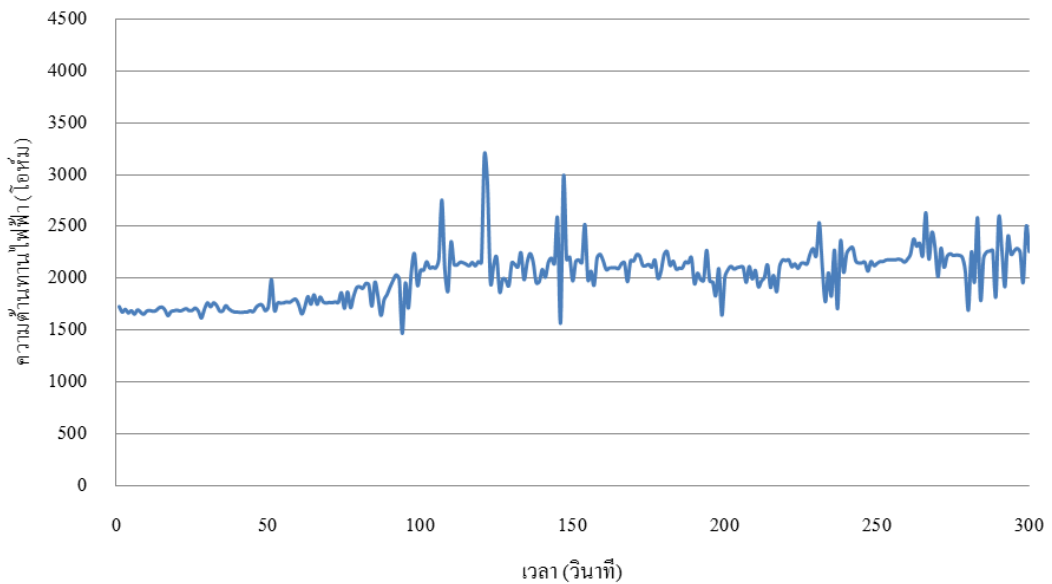
ภาพที่ ข.20 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



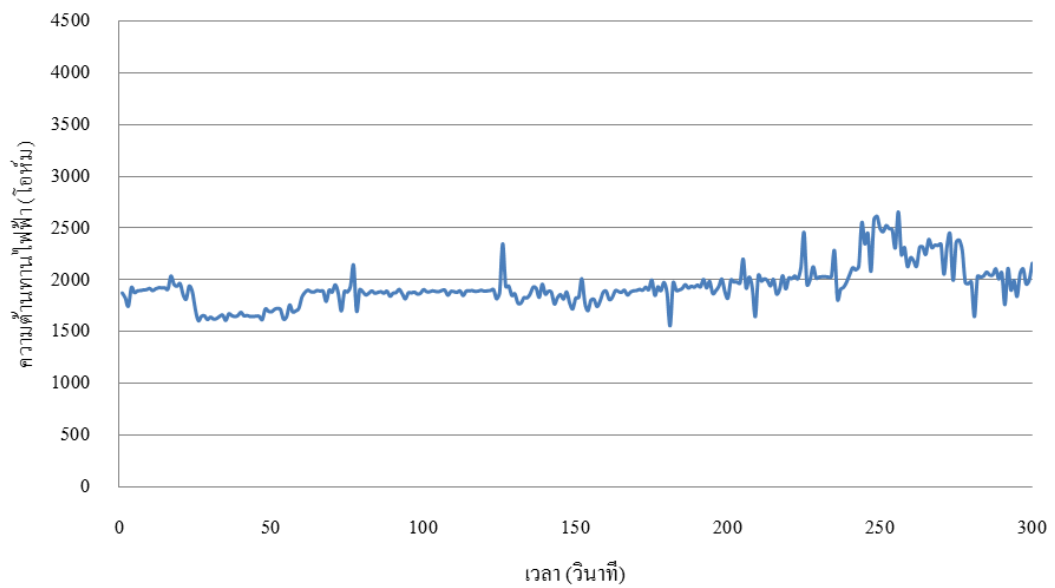
ภาพที่ ข.21 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



ภาพที่ ข.22 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1

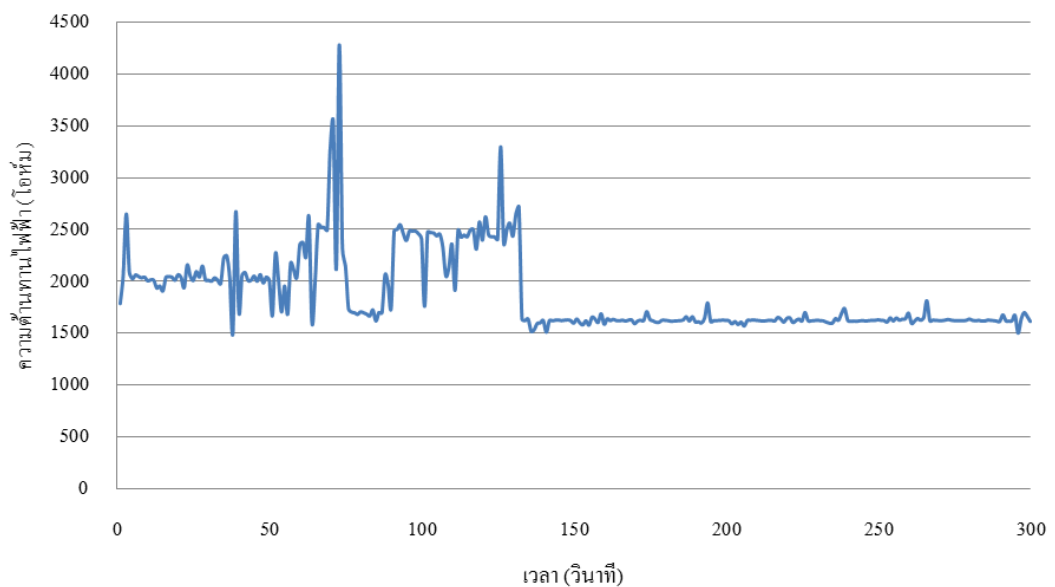
สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ ข.23 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

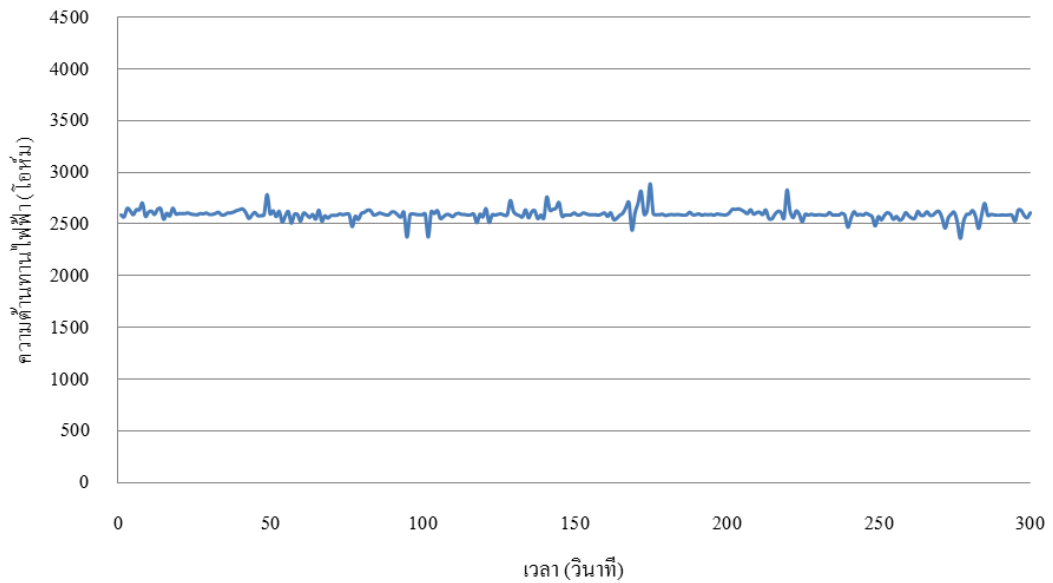


สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



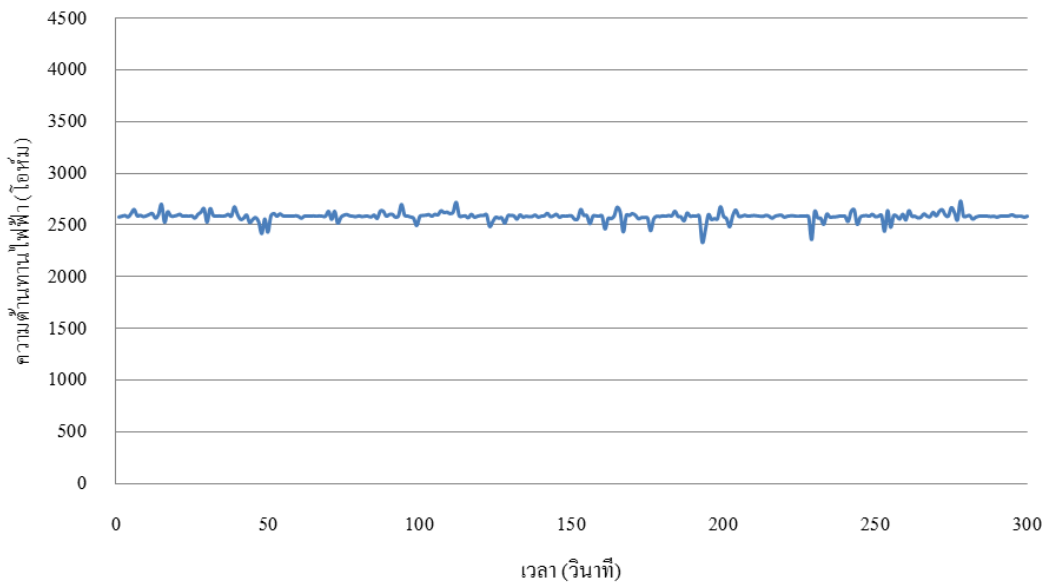
ภาพที่ ข.24 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



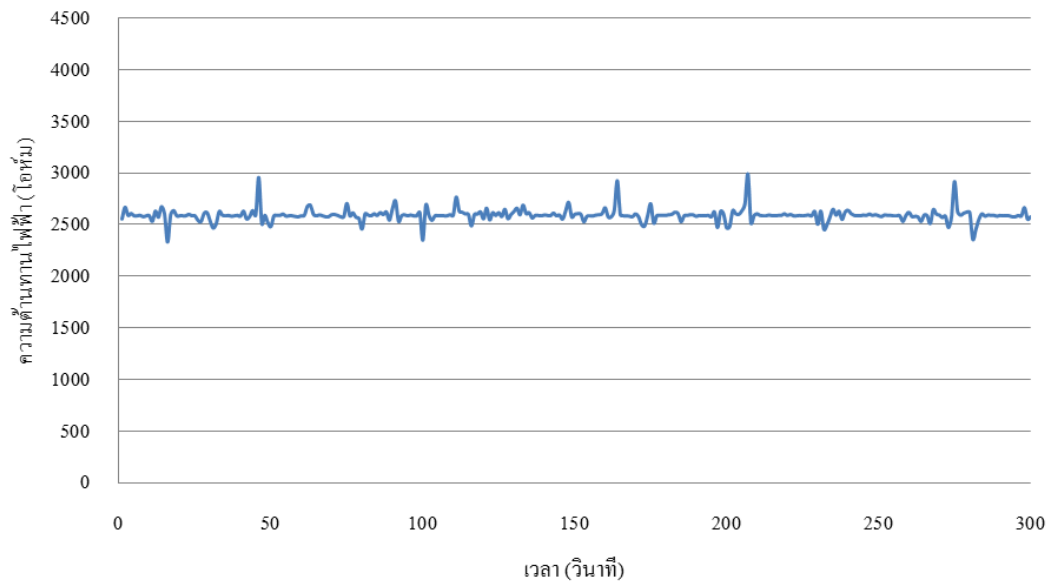
ภาพที่ ข.25 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



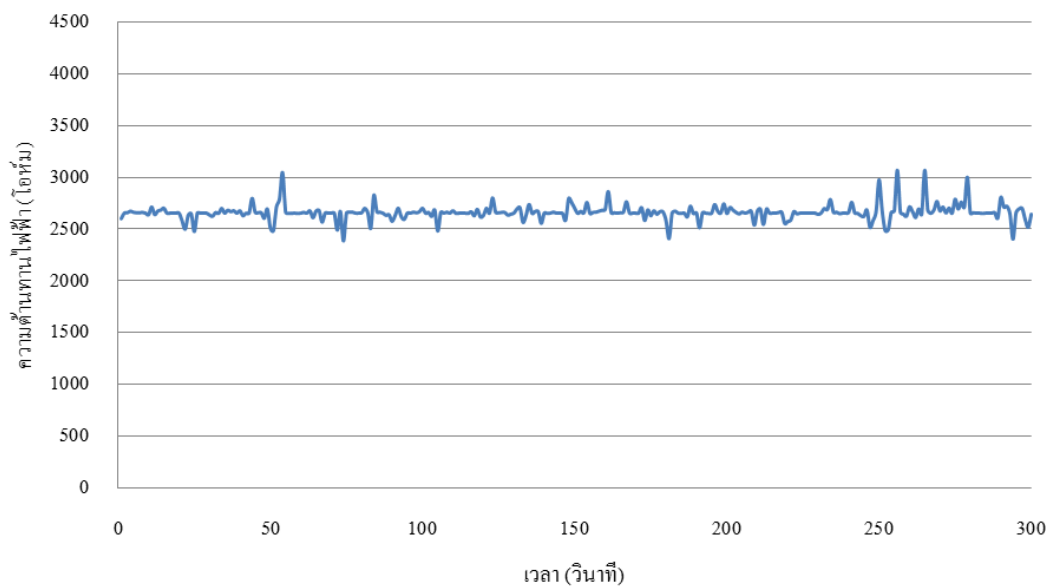
ภาพที่ ข.26 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



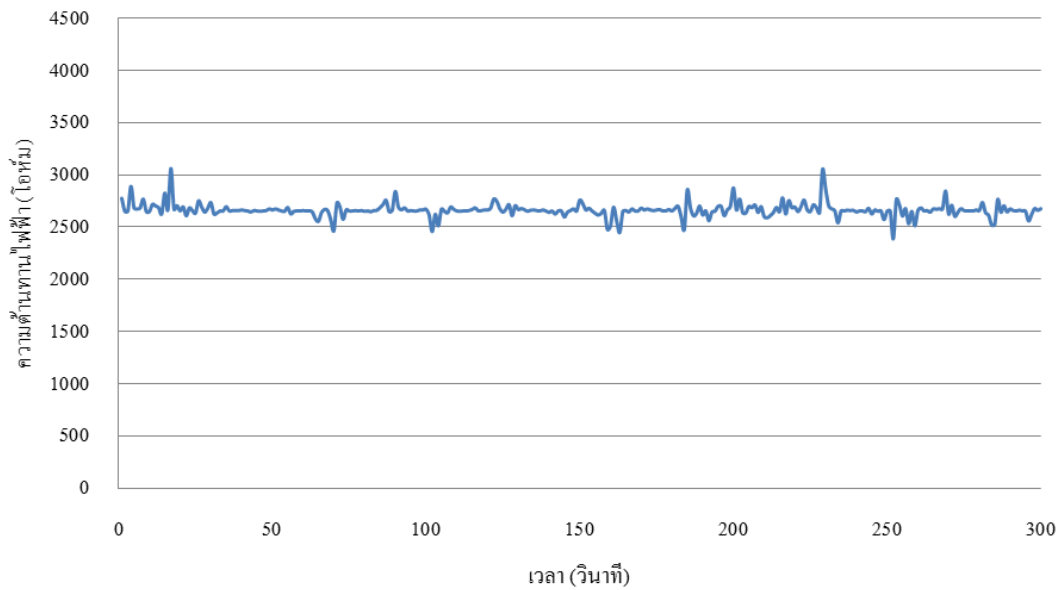
ภาพที่ ข.27 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 85 : 10 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1



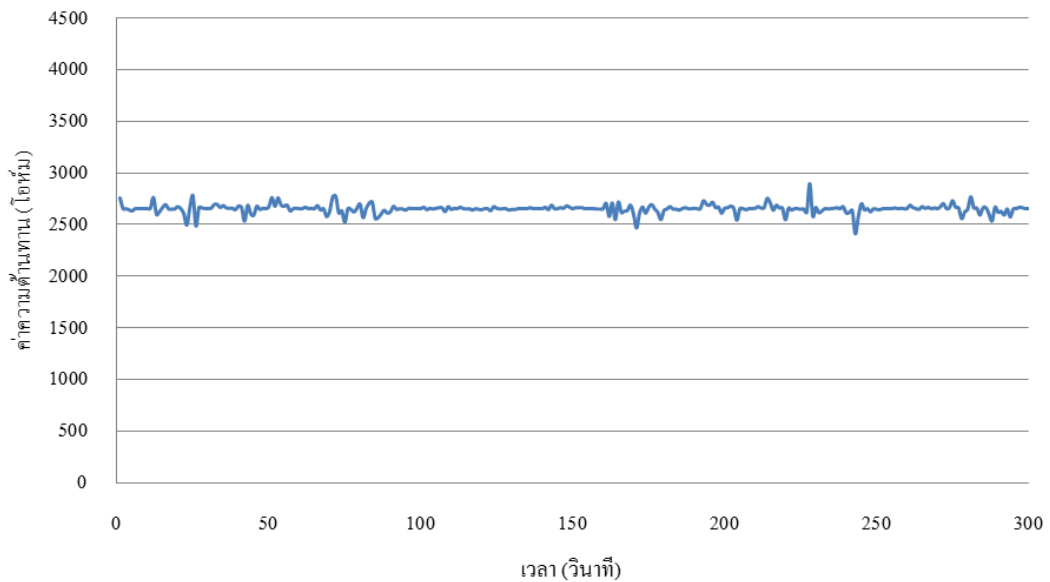
ภาพที่ ข.28 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 1

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ ข.29 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 2

สัดส่วนของ PEDOT:SS : DMSO : EG : Triton-X100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ ข.30 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ สัดส่วนของ (PEDOT:SS) : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 90 : 5 : 4 : 1 ตัวอย่างที่ 3

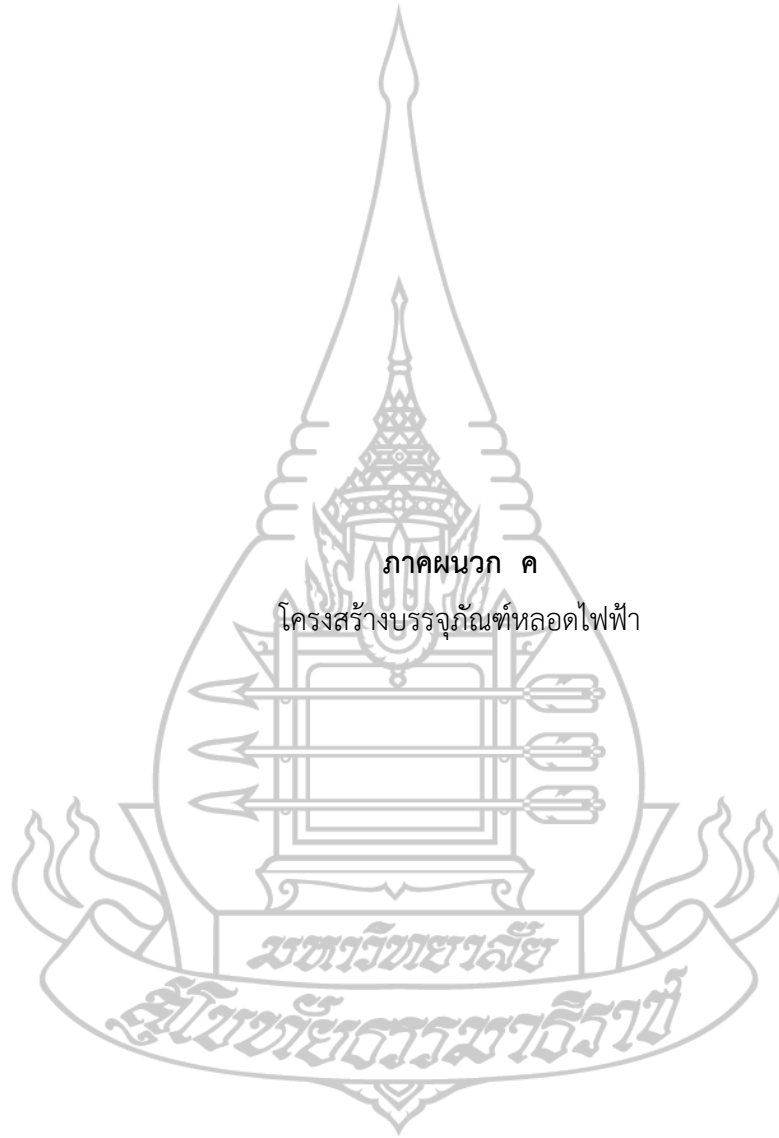
ตารางที่ ข.1 ค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในสัดส่วนต่าง ๆ

สัดส่วน PEDOT:PSS ที่	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) (Ω)	สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ($\Omega \cdot m$)	ค่าเฉลี่ยสภาพ ต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)
45	1	1,866.43	6.60×10^{-4}	6.29×10^{-4}
	2	1,577.88	5.58×10^{-4}	
	3	1,895.34	6.70×10^{-4}	
50	1	1,717.39	6.07×10^{-4}	6.06×10^{-4}
	2	1,723.08	6.09×10^{-4}	
	3	1,711.94	6.05×10^{-4}	
55	1	1,263.86	4.47×10^{-4}	4.27×10^{-4}
	2	1,227.78	4.34×10^{-4}	
	3	1,136.64	4.02×10^{-4}	
60	1	745.75	2.64×10^{-4}	2.39×10^{-4}
	2	659.10	2.33×10^{-4}	
	3	622.36	2.20×10^{-4}	
65	1	372.64	1.32×10^{-4}	1.30×10^{-4}
	2	370.99	1.31×10^{-4}	
	3	362.04	1.28×10^{-4}	
70	1	266.18	9.41×10^{-5}	0.81×10^{-5}
	2	215.19	7.60×10^{-5}	
	3	206.45	7.30×10^{-5}	
75	1	182.21	6.44×10^{-5}	0.68×10^{-5}
	2	182.93	6.46×10^{-5}	
	3	213.48	7.54×10^{-5}	

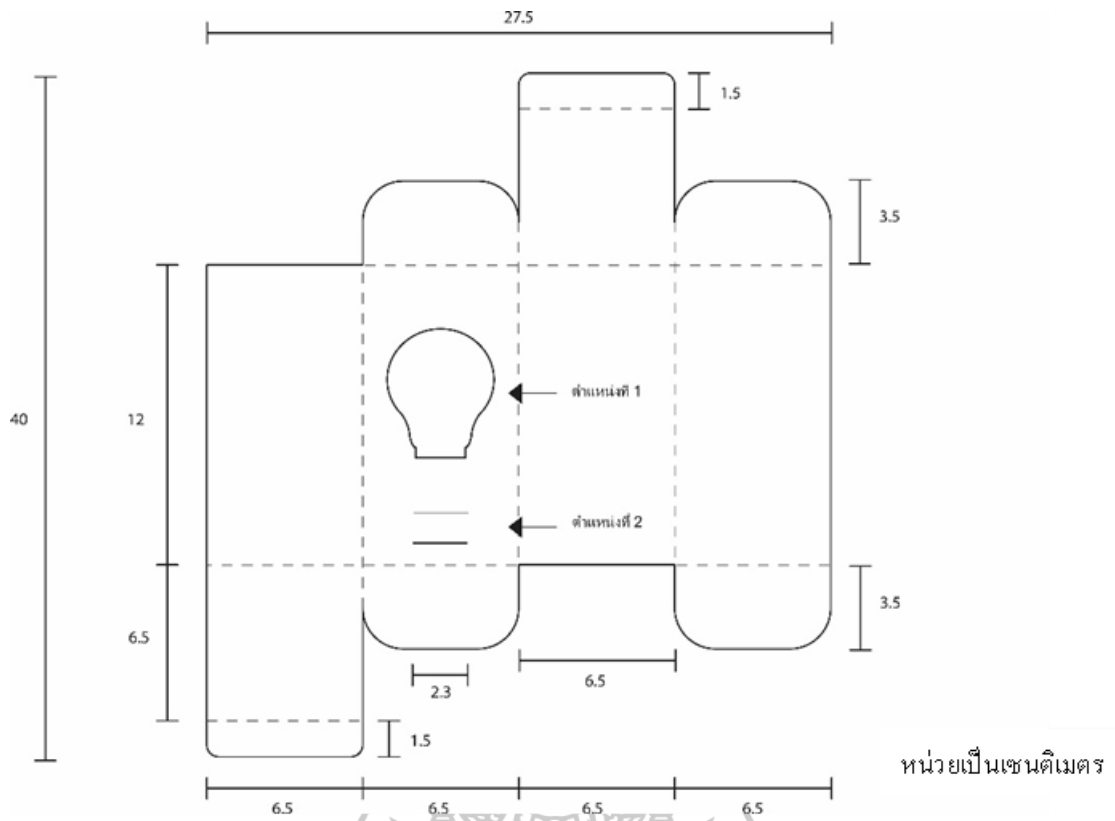
ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS
ในสัปดาห์ต่าง ๆ

สัปดาห์ PEDOT:PSS ที่	ตัวอย่าง ที่	ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) (Ω)	สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ($\Omega \cdot m$)	ค่าเฉลี่ยสภาพ ต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)
80	1	2,020.45	7.14×10^{-4}	6.94×10^{-4}
	2	1,937.31	6.85×10^{-4}	
	3	1,873.56	6.85×10^{-4}	
85	1	2,594.57	9.17×10^{-4}	9.15×10^{-4}
	2	2,583.78	9.13×10^{-4}	
	3	2,591.57	9.16×10^{-4}	
90	1	2,661.16	9.40×10^{-4}	9.39×10^{-4}
	2	2,662.65	9.41×10^{-4}	
	3	2,652.55	9.37×10^{-4}	

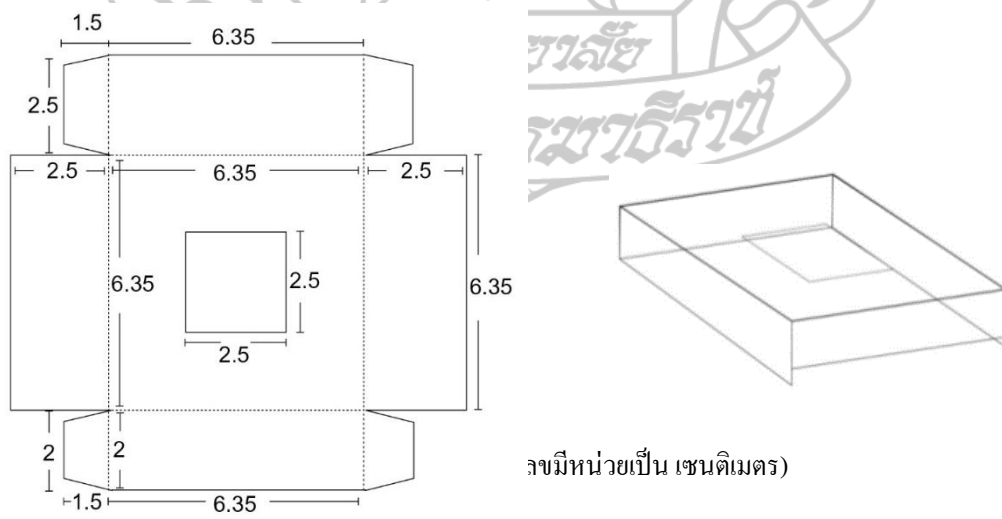




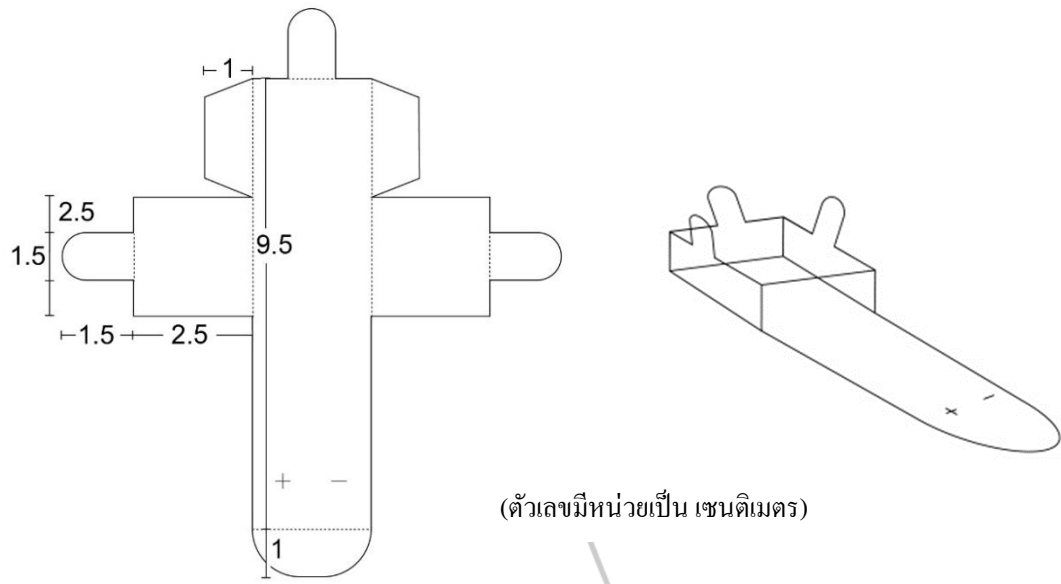
ภาคผนวก ค
โครงสร้างบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า



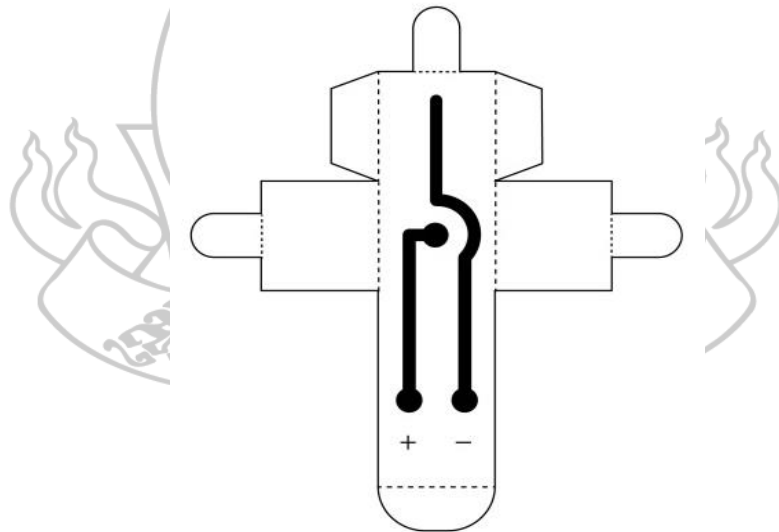
ภาพที่ ค.1 โครงสร้างภายนอกบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า



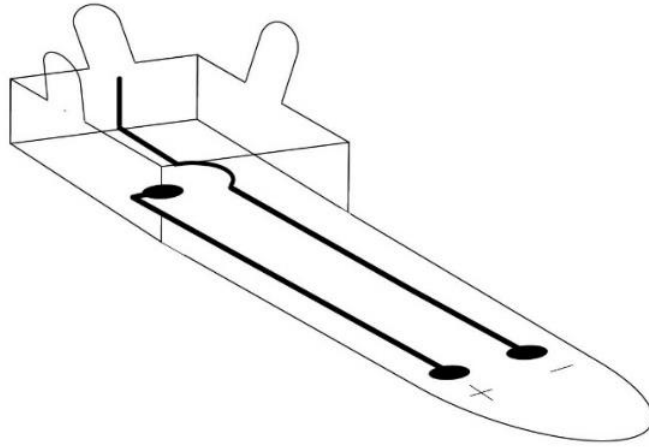
ภาพที่ ค.2 โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 1



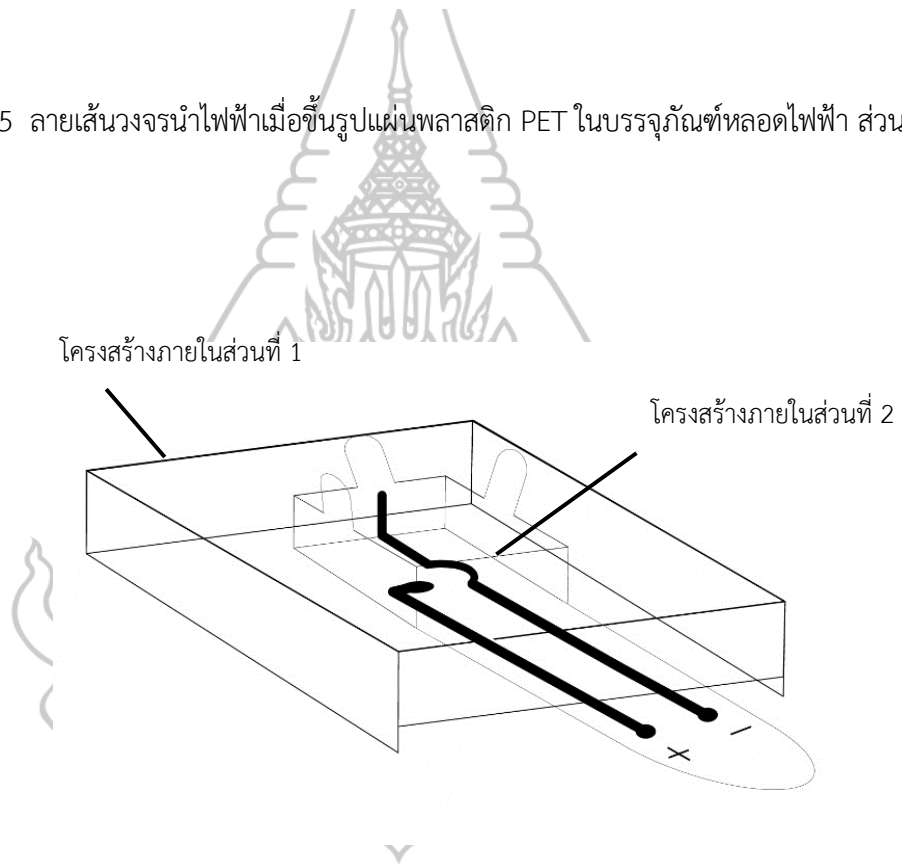
ภาพที่ ค.3 โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2



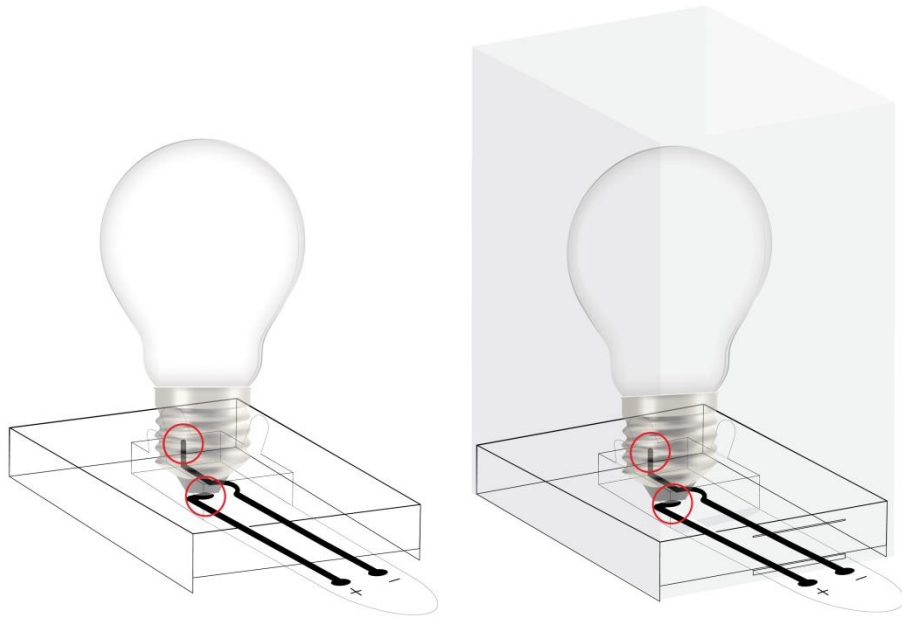
ภาพที่ ค.4 ลายเส้นวงจรรนำไฟฟ้าในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2



ภาพที่ ค.5 ลายเส้นวงจรรนำไฟฟ้าเมื่อขึ้นรูปแผ่นพลาสติก PET ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2



ภาพที่ ค.6 การประกอบโครงสร้างภายในส่วนที่ 1 และ โครงสร้างภายในส่วนที่ 2



ภาพที่ ค.7 บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า



ประวัติผู้ศึกษา

ชื่อสกุล	นางสาวสุวรรณา รุ่งเรือง
วัน เดือน ปี เกิด	6 พฤษภาคม 2529
สถานที่เกิด	เขตธนบุรี กรุงเทพฯ
ที่อยู่ปัจจุบัน	221/14 หมู่ 13 ตำบลในคลองบางปลากด อำเภอพระสมุทรเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ 10290
ประวัติการศึกษา	สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ประวัติการทำงาน	อาจารย์ (พนักงานเงินรายได้) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

