

SWURES14-065 การวิเคราะห์สัดส่วนของ PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในหมึกพิมพ์ นำไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า OPTIMAL PROPORTION ANALYSIS OF PEDOT:PSS IN CONDUCTIVE INK FOR LAMP PACKAGING APPLICATION

สุวรรณ รุ่งเรือง¹ ผกา มาศ ผจญ แก้ว²

Suvanna Rungruang¹ Pakamas Pachonklaew²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช

¹'Master Degree' student of Industrial Technology, School of Science and Technology
Sukhothai Thammathirat Open University

²รองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช

²Associate Professor, School of Science and Technology Sukhothai Thammathirat Open University

*Corresponding author, E-mail: 2599601008@stou.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ หมึกพิมพ์ประกอบด้วยสารเคมี PEDOT:PSS, DMSO, EG และ Octyl phenol ethoxylate (Triton x-100) บทบาทของสาร PEDOT:PSS คือ สารนำไฟฟ้า สาร DMSO ถูกใช้เป็นตัวทำละลายที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ในขณะที่สาร EG และ สาร Triton X-100 ถูกใช้เพื่อปรับปรุงความหนืด และแรงดึงผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า หมึกพิมพ์ถูกพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยวิธีการพิมพ์แบบพ่นหมึกด้วยสัดส่วนความเข้มข้นของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ตั้งแต่ 45 : 50 : 4 : 1 จนถึง 90 : 5 : 4 : 1 หมึกพิมพ์ จำนวน 5 ชั้น ถูกทดสอบเพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วงจรไฟฟ้ากระแสตรง โปรแกรม LabVIEW อุปกรณ์ NI USB DAQ 6008 และคอมพิวเตอร์แบบพกพา ถูกใช้เพื่อตรวจสอบสัญญาณโดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในทุกวินาที ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างถูกนำไปคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบ จากผลการทดลอง พบว่า สัดส่วนความเข้มข้นที่ดีที่สุดของ สาร PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 สำหรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด ได้แก่ 75 : 20 : 4 : 1 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ได้จากเงื่อนไขที่ดีที่สุดถูกพิมพ์ด้วยระบบพ่นหมึกลงบนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) สำหรับการประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าชนิด LED ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าชนิด LED โดยที่หลอดไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องถูกนำออกจากบรรจุภัณฑ์

คำสำคัญ: หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า, พอลิเมอร์ PEDOT:PSS, บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

Abstract

This research aims to investigate the optimum condition for preparing the conductive ink with the lowest resistance. The ink consists of chemicals such as poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS), Dimethyl Sulfoxide (DMSO), Ethylene Glycol (EG) and Octyl phenol ethoxylate (Triton x-100). The role of PEDOT:PSS is the conductive material. DMSO was used as a solvent with low baseline resistance, while EG and Triton x-100 were used to improve of the viscosity and surface tension for the conductive ink. The ink was printed onto the polyethylene terephthalate (PET) substrates by inkjet printing in different PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 concentration ratios from 45 : 50 : 4 : 1 to 90 : 5 : 4 : 1 conditions. The five printed-layers of all samples were tested to investigate their resistivity values by direct current circuit. A LabVIEW software and a NI USB DAQ 6008 device operated with a laptop computer were used to monitor the signals by measuring the sample resistance in every second. The resistances of all samples were conducted to calculate the resistivity values for comparison. This result indicates that the optimum concentration ratio of PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 chemicals for the lowest resistivity value is 75 : 20 : 4 : 1. The ink with the best condition was inkjet printed on PET substrate for application in light emitting diode (LED) lamp packaging. The result demonstrates that the ink can be applied to design a package for testing the operation of LED lamp while the lamp does not need to be removed from the package.

Keyword: Conductive inks, Poly (3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) PEDOT:PSS, Lamp packaging

บทนำ/Introduction

ปัจจุบันมีการนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า (Conductive Ink) มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ จอภาพอิเล็กทรอนิกส์ ตกแต่งภายในอาคาร การแพทย์ และพัฒนาสิ่งพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในด้าน การเข้าถึงข้อมูลได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ปัจจุบันมีการพัฒนาสารนำไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่นำมาเป็นส่วนผสมในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เช่น หมึกพิมพ์ซิลเวอร์นาโน (Silver Conductive Ink) [1-2] หมึกพิมพ์ทองแดงนำไฟฟ้า (Copper Conductive Ink) [3-4] หมึกพิมพ์ท่อนาโนคาร์บอนนำไฟฟ้า (Carbon Nanotube Conductive Ink) [5-6] และหมึกพิมพ์กราฟีนนำไฟฟ้า (Graphene Conductive Ink) [7-8] เป็นต้น การพัฒนาสารนำไฟฟ้าเพื่อให้สามารถนำไปติดตั้งเข้ากับวัสดุ 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 PSS ทำหน้าที่ยึดติดกับสารเคมีชนิดอื่น และส่วน PEDOT ทำหน้าที่นำไฟฟ้า ทำให้สาร PEDOT:PSS มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี มีสมบัติละลายน้ำได้ดี สามารถใช้เคลือบบนวัสดุต่าง ๆ ได้ อีกทั้งยังมีราคาถูกกว่าสารนำไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้ จึงได้นำสาร PEDOT:PSS พัฒนาเป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสำหรับบรรจุภัณฑ์บรรจุหลอดไฟ โดยผสมกับสาร Dimethyl Sulfoxide (DMSO) ซึ่งเป็นตัวทำละลาย สาร Ethylene Glycol (EG) สารป้องกันการแข็งตัว และสาร Triton x-100 เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อให้บรรจุภัณฑ์หลอดไฟสามารถใช้ตรวจสอบการทำงานของหลอดไฟที่บรรจุได้ก่อนที่ผู้ซื้อจะซื้อจากร้านค้าที่ขาย โดยไม่ต้องแกะกล่องเพื่อนำหลอดไฟออกมาทดสอบกับปลั๊กไฟ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย/Objectives

1. เพื่อวิเคราะห์สภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สารนำไฟฟ้า PEDOT:PSS
2. เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบต่าง ๆ ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้ PEDOT:PSS เป็นสารนำไฟฟ้า เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

วิธีดำเนินการวิจัย/Methods

1. ขั้นตอนการผสมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

นำสาร PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ผสมในบีกเกอร์ด้วยเครื่องกวนสาร เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ตามสัดส่วนในตารางที่ 1 ควบคุมปริมาตรสารด้วยไมโครปิเปต ทำเช่นนี้จนครบทุกสัดส่วน

ตารางที่ 1 สัดส่วนของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100

สารเคมี \ สัดส่วน (wt%)	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	10	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

2. ขั้นตอนการพิมพ์

นำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ปริมาตร 1,000 ไมโครลิตร ใส่ลงในถาดหมึกพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Ink Jet Printer) ยี่ห้อ HP รุ่น Desk Jet 1112 พิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS บนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) จำนวน 5 ครั้ง กำหนดให้ภาพที่มีพิมพ์มีขนาด 1 เซนติเมตร × 0.8 เซนติเมตร นำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS แต่ละสัดส่วนไปทดสอบความต้านทานไฟฟ้าด้วยชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง วัดค่าความต้านทานเป็นเวลา 300 วินาที แสดงผลและบันทึกผลด้วยโปรแกรม LabVIEW 2018 โดยในแต่ละสัดส่วนจะทำซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานไฟฟ้า

3. ขั้นตอนทดสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

นำค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่ได้จากการทำซ้ำในแต่ละครั้งมาคำนวณเพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จากนั้นนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแต่ละสัดส่วนที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยการคำนวณด้วยความสัมพันธ์

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

โดยที่ R คือ ความต้านทานไฟฟ้า 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)

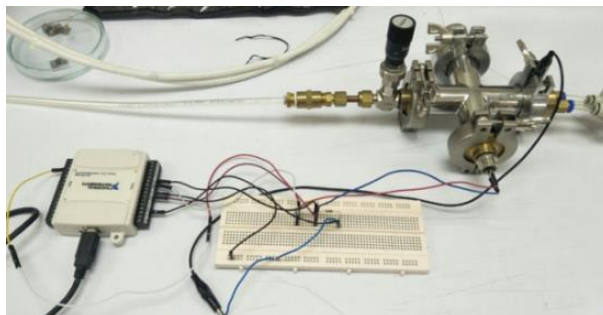
4. ขั้นตอนการสร้างบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

ออกแบบลายเส้นสำหรับพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยนำสัดส่วนของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่มีค่าเฉลี่ยสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เหมาะสมมาพิมพ์บนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) จากนั้นนำไปประกอบในกล่องของบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า พร้อมทดสอบการทำงานโดยที่หลอดไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องถูกนำออกจากบรรจุภัณฑ์

ผลการวิจัย/Results

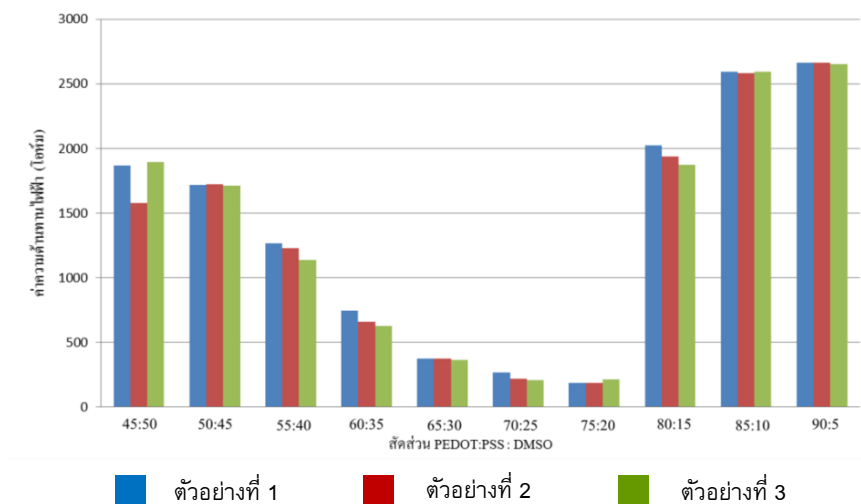
1. ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ดำเนินการโดยใช้ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังภาพที่ 1 ประกอบด้วย ตัวต้านทาน สายไฟขนาดเล็ก บอร์ดวงจรไฟฟ้า ตัวประมวลผล (NI USB DAQ 6008) ดำเนินการทดสอบในระบบปิด แสดงผลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2018 วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าทุก ๆ 1 วินาที เป็นเวลา 300 วินาที โดยวิธีดังกล่าวถูกนำไปใช้วัดค่าความต้านทานของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่สามารถตรวจจับแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia, NH₃) [5-6] และสารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) [9] วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้างดังกล่าว ถูกรายงานว่ามีความแม่นยำสูง [10]



ภาพที่ 1 ชุดทดสอบวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

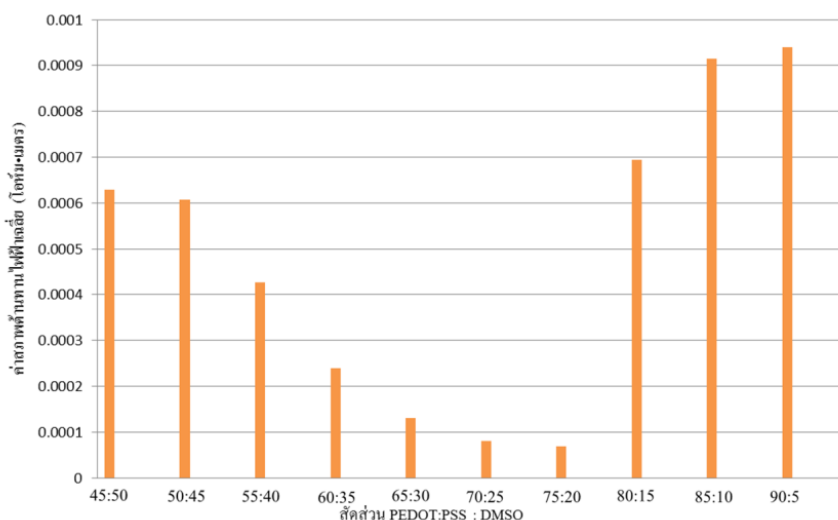
ในการทดลอง หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ประกอบด้วย PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 แบ่งออกเป็น 10 สัดส่วนโดยใช้ร้อยละโดยน้ำหนัก ได้แก่ 45 : 50 : 4 : 1, 50 : 45 : 4 : 1, 55 : 40 : 4 : 1, 60 : 35 : 4 : 1, 65 : 30 : 4 : 1, 70 : 25 : 4 : 1, 75 : 20 : 4 : 1, 80 : 15 : 4 : 1, 85 : 15 : 4 : 1 และ 90 : 5 : 4 : 1 โดยในแต่ละสัดส่วนบันทึกข้อมูลจำนวน 300 ค่า และทำซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเปรียบเทียบความต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS แต่ละสัดส่วน

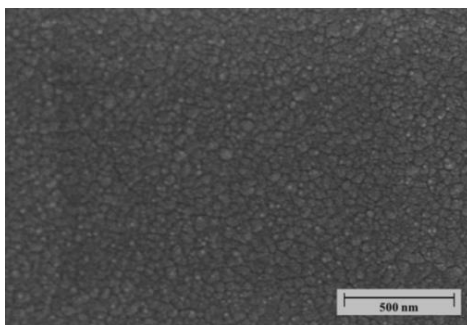
2. สภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

จากการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้ค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วนที่ S1, S2, S3, S4, S5, S6, และ S7 มีค่าเท่ากับ 6.3×10^{-4} , 6.1×10^{-4} , 4.3×10^{-4} , 2.4×10^{-4} , 1.3×10^{-4} , 0.8×10^{-4} และ 0.7×10^{-4} โอห์ม-เมตร ตามลำดับ และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วนที่ S8, S9 และ S10 มีค่าเท่ากับ 6.9×10^{-4} , 9.2×10^{-4} และ 9.4×10^{-4} โอห์ม-เมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วนที่ S1, S2, S3, S4, S5, S6, และ S7 มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง เมื่อปริมาณ PEDOT:PSS มากขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วนที่ S8, S9 และ S10 พบว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการพร่องตัวทำลาย DMSO มีผลทำให้ PEDOT:PSS ถูกละลายและกระจายตัวได้ไม่ดี [11]



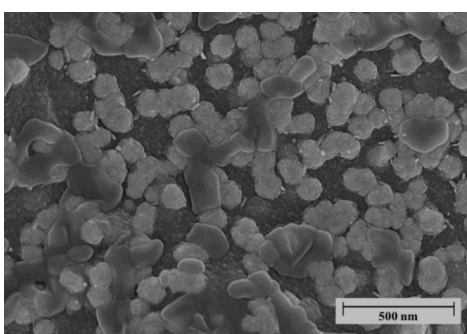
ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS แต่ละสัดส่วน

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Ink Jet Printer) ลงบนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) จำนวน 5 ครั้ง โดยกำหนดให้ภาพที่พิมพ์มีขนาด 1 เซนติเมตร × 0.8 เซนติเมตร เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) กำลังขยาย 60,000 เท่า เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า พบว่า พื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีลักษณะเป็นเกรน (Grain) ขนาดประมาณ 25 – 75 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า สัดส่วนของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1

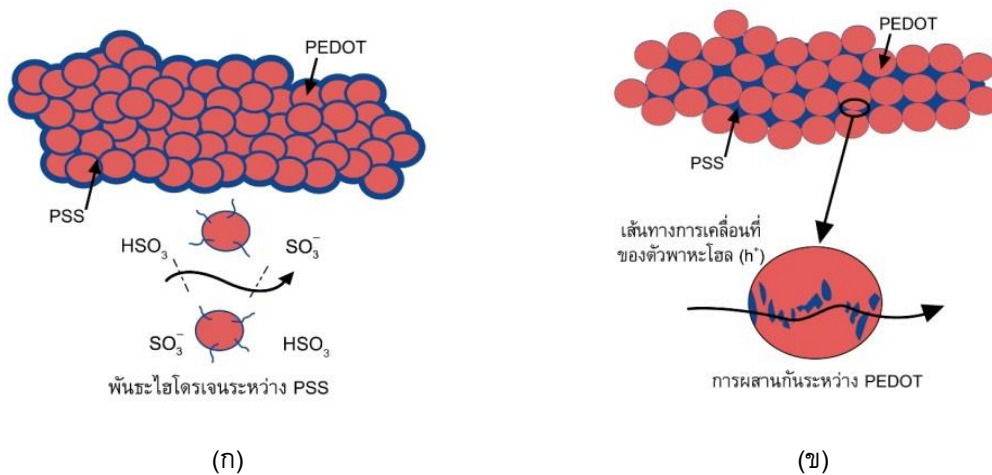
หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1 พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Ink Jet Printer) ลงบนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) จำนวน 5 ครั้ง โดยกำหนดให้ภาพที่พิมพ์มีขนาด 1 เซนติเมตร × 0.8 เซนติเมตร เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) กำลังขยาย 60,000 เท่า เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า พบว่า พื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีลักษณะเป็นเกรน (Grain) ขนาดใหญ่ประมาณ 100 – 300 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า สัดส่วนของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 80 : 15 : 4 : 1

โดยทั่วไป การเตรียมฟิล์มที่มีขนาดเกรนใหญ่กว่าควรจะมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่าฟิล์มที่มีขนาดเกรนเล็ก หรือกล่าวมีนัยหนึ่งคือ ฟิล์มที่มีขนาดเกรนใหญ่ควรจะมีสภาพนำไฟฟ้าได้ดีกว่าฟิล์มที่มีขนาดเกรนเล็ก แต่ผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าไม่ได้เป็นเช่นนั้น สภาพนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์พอลิเมอร์ PEDOT:PSS

สามารถอธิบายด้วยปรากฏการณ์การเชื่อมต่อนะหว่าง PEDOT (Inter-PEDOT bridging phenomenon) โดยส่วนของ PEDOT มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี และส่วนของ PSS มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่ทำหน้าที่ช่วยยึดเกาะระหว่างโมเลกุล เมื่อเติมตัวทำละลาย DMSO ในหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีผลทำให้เกิดการแยกส่วนระหว่าง PEDOT และ PSS ดังนั้น หมึกพิมพ์ที่มีการพ่นของตัวทำละลาย DMSO จะประกอบด้วยแกนของ PEDOT (PEDOT-rich core) จำนวนมากและเปลือกของ PSS (PSS-rich shell) จำนวนมาก เกิดการยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนได้เป็นเกรนขนาดใหญ่ แสดงดังภาพที่ 6 (ก) ดังนั้น หมึกพิมพ์ PEDOT:PSS ที่มีการพ่นของ DMSO จะมีเปลือกของ PSS มีจำนวนมาก ส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวพาหะโฮลมีระยะทางสั้น ทำให้หมึกพิมพ์มีสภาพนำไฟฟ้าไม่ต่ำ หรือมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูง ในทางตรงกันข้าม จากภาพที่ 6 (ข) หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่ไม่มีการพ่นของตัวทำละลาย DMSO จะเกิดการแยกส่วนระหว่างแกน PEDOT กับเปลือก PSS ทำให้แกน PEDOT เกิดการผสมกันบางส่วน มีผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวพาหะโฮลมีระยะทางเพิ่มขึ้น ทำให้หมึกพิมพ์มีสภาพนำไฟฟ้าที่ดี หรือมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำ

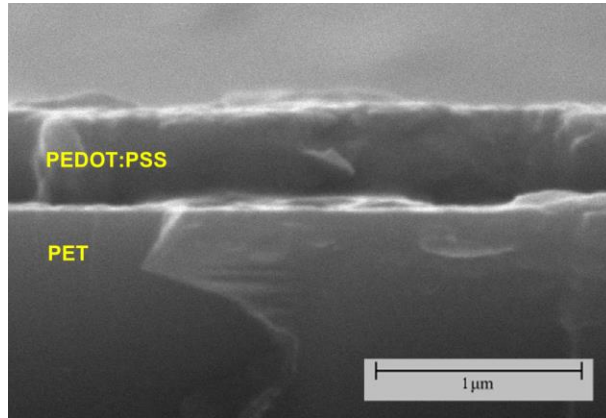


ภาพที่ 6 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของตัวพาหะโฮล (h^+)

(ก) มีการพ่นของ DMSO

(ข) ไม่มีการพ่นของ DMSO

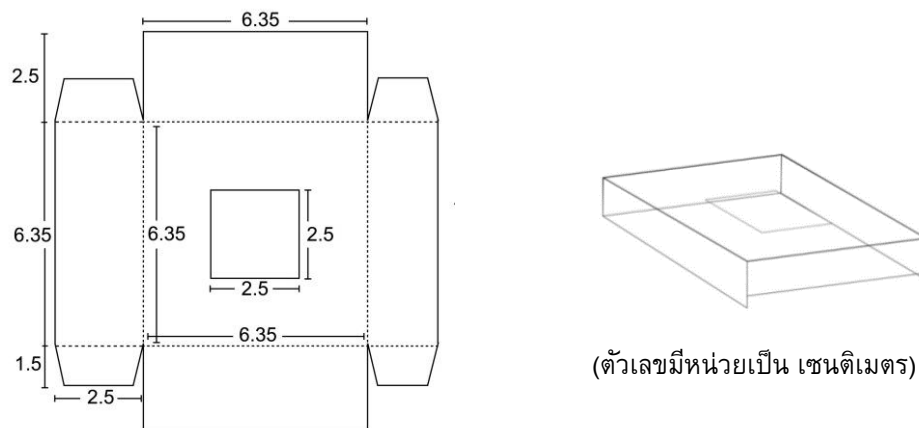
สำหรับค่าความหนาของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS บนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) สามารถวัดได้จากภาพภาคตัดขวาง (Cross-Section) ของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 80,000 เท่า วิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม ImageJ โดยวัดค่าความหนาจำนวน 20 ครั้ง และคำนวณหาค่าเฉลี่ย พบว่า ความหนาเฉลี่ยของชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในทุก ๆ สัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 441.7 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 7



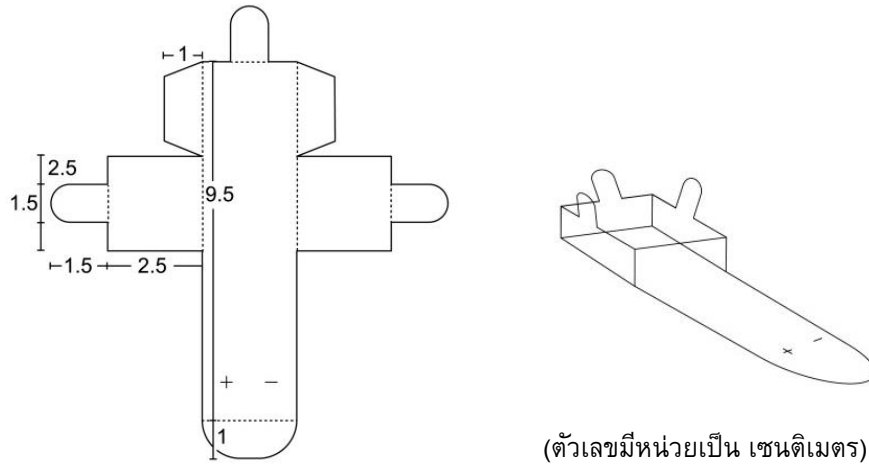
ภาพที่ 7 ภาพถ่าย SEM แบบภาคตัดขวางแสดงความหนาของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

3. การประยุกต์ใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า

จากการนำสาร PEDOT:PSS มาใช้เป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสำหรับบรรจุภัณฑ์บรรจุหลอดไฟฟ้า โดยผสมกับสาร DMSO ที่เป็นตัวทำละลาย สาร Ethylene glycol (EG) เพื่อป้องกันการแข็งตัว และสาร Triton x-100 เพื่อลดแรงตึงผิวในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อให้สามารถทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าได้ โดยไม่ต้องนำหลอดไฟฟ้าออกจากบรรจุภัณฑ์ พบว่า บรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้นนั้น จะต้องทำการเพิ่มขึ้นส่วนโครงสร้างภายในจำนวน 2 ส่วน จากแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยส่วนที่ 1 ใช้เป็นส่วนยึดชั่วคราวหลอดไฟฟ้าป้องกันการกระแทกของหลอดไฟฟ้าขณะเคลื่อนย้าย แสดงดังภาพที่ 8 สำหรับส่วนที่ 2 ถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นแผ่นรองรับสำหรับพิมพ์หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 9

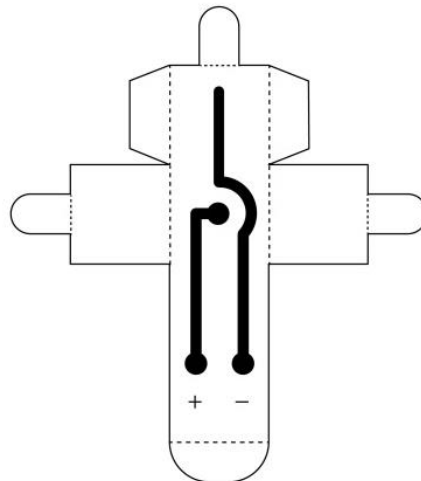


ภาพที่ 8 โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 1



ภาพที่ 9 โครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2

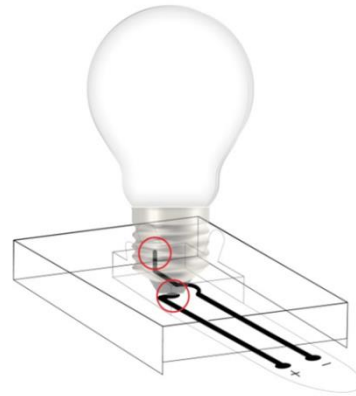
สำหรับโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 2 นี้ ได้ทำการพิมพ์ลายเส้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สำหรับใช้เป็นเส้นทางนำไฟฟ้าเพื่อทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า ซึ่งจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของหมึกพิมพ์ นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า คือ สัดส่วนของ PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1 โดยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS จะถูกพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) แสดงดังภาพที่ 10 การประกอบโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์ส่วนที่ 1 และ 2 เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 เส้นทางนำไฟฟ้าสำหรับทดสอบหลอดไฟในบรรจุภัณฑ์



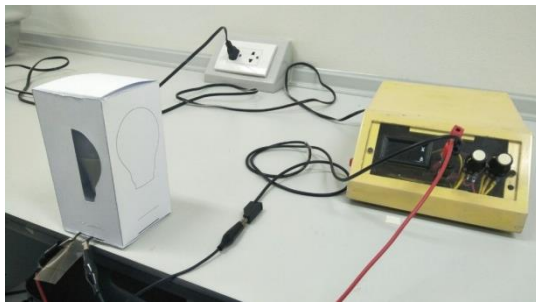
(ก) ภาพถ่าย



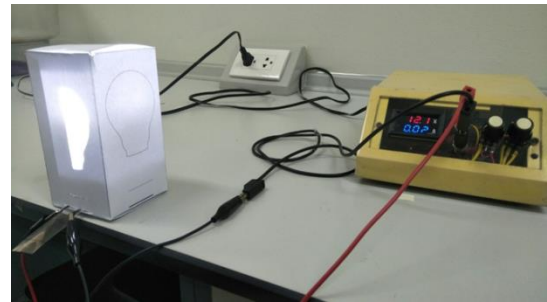
(ข) แผนภาพ

ภาพที่ 11 การประกอบโครงสร้างภายในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ส่วนที่ 1 และ 2
(ก) ภาพถ่าย และ (ข) แผนภาพ

เมื่อนำโครงสร้างภายในของบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วน มาประกอบเพื่อใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้านิต LED ความต่างศักย์ ไฟฟ้า 12 โวลต์ ชนิดกระแสตรง (DC 12V) กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ โดยการทดลองต่อหลอดไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์กระแสตรงในขณะที่หลอดไฟฟ้าบรรจุอยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ พบว่า หลอดไฟฟ้ามสว่าง ดังแสดงในภาพที่ 12



(ก)



(ข)

ภาพที่ 12 ภาพถ่ายแสดงการทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า
(ก) ก่อน และ (ข) หลัง เปิดสวิตช์แหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า

อภิปรายผลการวิจัย/Discussions

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าประกอบด้วยสาร PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี (p-type semiconductor) โดยมีพาหะในการนำไฟฟ้าคือ โฮล (hole) ความสามารถในการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณและการละลายของ PEDOT:PSS โดยการละลายของ PEDOT:PSS ขึ้นอยู่กับปริมาณตัวทำละลาย DMSO โดยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ไม่มีการพร่องของ DMSO จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี

จากการนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้าชนิด LED ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ โดยนำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าทึดสัดส่วนไปพิมพ์บนแผ่นพลาสติก พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Ink Jet Printer) พบว่า หมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีความหนาไม่แตกต่างกัน และเมื่อนำหมึกพิมพ์ นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่สัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 เท่ากับ 75 : 20 : 4 : 1 ไปใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า พบว่า สามารถใช้ทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องนำหลอดไฟฟ้าออกจากบรรจุภัณฑ์

สรุปผลการวิจัย/Conclusions

ในงานวิจัยนี้ หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าประกอบด้วย PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 นำมาผสมกันในสัดส่วนที่ต่างกัน จากนั้นนำมาพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก (Ink Jet Printer) บนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยกำหนดให้ภาพที่พิมพ์มีขนาด 1 เซนติเมตร × 0.8 เซนติเมตร พบว่า ผิวหน้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีลักษณะเป็นเกรน โดยขนาดเกรนขึ้นกับปริมาณตัวทำละลาย DMSO และความหนาเฉลี่ยของชั้นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ในทุกสัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 441.7 นาโนเมตร

จากการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ของแต่ละสัดส่วน พบว่า เมื่อปริมาณ PEDOT:PSS เพิ่มขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการพร่องของ DMSO จะมีผลทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีค่าสูง จึงสรุปได้ สัดส่วนของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุด หรือค่าสภาพนำไฟฟ้าดีที่สุด คือ สัดส่วน PEDOT:PSS : DMSO : EG : Triton x-100 ที่ 75 : 20 : 4 : 1

สำหรับบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า จะต้องทำการเพิ่มขึ้นส่วนโครงสร้างภายในจำนวน 2 ส่วน จากวัสดุพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยส่วนที่ 1 ใช้เป็นส่วนยึดขั้วหลอดไฟ ป้องกันการกระแทกของหลอดไฟขณะเคลื่อนย้าย และส่วนที่ 2 เป็นชิ้นส่วนสำหรับใช้ในการทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้า เมื่อทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าชนิด LED ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ ด้วยหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ลงบนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เพื่อใช้เป็นเส้นทางนำไฟฟ้าสำหรับทดสอบหลอดไฟฟ้าในบรรจุภัณฑ์ พบว่า หลอดไฟฟ้าสว่าง ดังนั้น หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์หลอดไฟฟ้า ซึ่งสามารถทดสอบการทำงานของหลอดไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องนำหลอดไฟฟ้าออกจากบรรจุภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง/References

- [1] Merilampi, S. (2010, December). Analysis of electrically conductive silver ink on stretchable substrates under tensile load. *Microelectronics Reliability*. 50(12): 2001-20011. Retrieved June 2, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026271410002568>

- [2] Nie, X. (2012, November). Inkjet printing of silver citrate conductive ink on PET substrate. *Applied Surface Science*. 261: 554-560. Retrieved June 8, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433212014328>
- [3] Abhinav K, V. (2015). Copper conductive ink: synthesis and utilization in flexible electronics. *RSC Advances*. 5(79): 63985-64030. Retrieved June 6, 2020, from <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ra/c5ra08205f#!divAbstract>
- [4] Kang, S. (2019). Self-reducible copper complex inks with two amines for copper conductive films via calcination below 100°C. *Chemical Physics Letters*. 763: 138248. Retrieved July 10, 2020, from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021CPL...76338248K/abstract>
- [5] Pakdee, U. (2019). Growth of MWCNTs on plasma ion-bombarded thin gold films and their enhancements of ammonia-sensing properties using inkjet printing. *Journal of Nanotechnology*. 2019: 3424915. Retrieved July 10, 2020, from <https://www.hindawi.com/journals/jnt/2019/3424915/>
- [6] Pakdee, U. (2020). Modification of Stainless Steel Surface for MWCNT Inkjet Printed Gas Sensor. *Suranaree Journal of Science and Technology*. 27(2): 030021. Retrieved July 14, 2020, from <http://ird.sut.ac.th/e-journal/index.php?year=2020&no=2&vol=27>
- [7] Saidina, D.S. (2019). Recent Development of graphene-based ink and other conductive material-based inks for flexible electronics. *Journal of Electronic Materials*. 48(6): 3428-3450. Retrieved July 14, 2020, from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-019-07183-w>
- [8] Seekaew, Y. (2014, September). Low-cost and flexible printed graphene–PEDOT:PSS gas sensor for ammonia detection. *Organic Electronics*. 15(11): 2971-2981. Retrieved July 23, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1566119914003723>
- [9] Pakdee, U. (2019). Room temperature gas sensor based on helical carbon coils. *Key Engineering Materials*. 798: 105-110. Retrieved July 23, 2020, from <https://www.scientific.net/KEM.798.105>
- [10] Lata, S. (2018). Development of virtual resistance meters using LabVIEW. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 8(1): 133-140. Retrieved July 23, 2020, from <http://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/10107>
- [11] Fan, X. (2019, October). PEDOT:PSS for flexible and stretchable electronics: Modifications, strategies, and applications. *Advanced Science*. 6(19): 1900813. Retrieved August 10, 2020, from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.201900813>