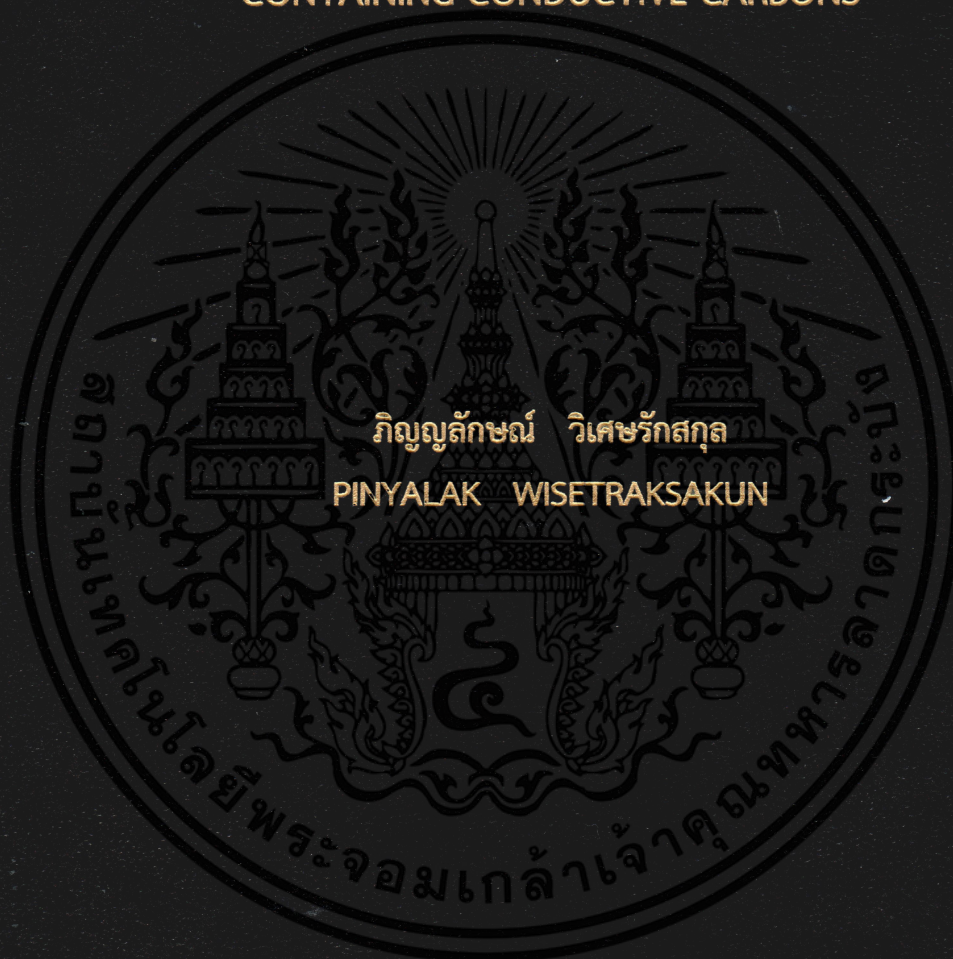


การเตรียมหมึกนำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์และ
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์โดยใช้อนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้า

PREPARATION OF CONDUCTIVE INKS FROM
EPOXIDIZED SOYBEAN OIL AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER
CONTAINING CONDUCTIVE CARBONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-024

การเตรียมหมึกนำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์และ
ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์โดยใช้อนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้า

PREPARATION OF CONDUCTIVE INKS FROM
EPOXIDIZED SOYBEAN OIL AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER
CONTAINING CONDUCTIVE CARBONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF CONDUCTIVE INKS FROM
EPOXIDIZED SOYBEAN OIL AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER
CONTAINING CONDUCTIVE CARBONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-SC-M-014-024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมหมึกนำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์และยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์โดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนนำไฟฟ้า
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล
รหัสประจำตัว	59605035
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าฐานน้ำมันถั่วเหลือง (Soy-based conductive inks) จากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidised soybean oil, ESO) เป็นฐานหมึกพิมพ์ ผสมร่วมกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidised natural rubber, ENR) โดยใช้ไขมันลินสีดและน้ำมันถั่วซึ่งเป็นน้ำมันชักแห้ง (Drying oil) เป็นสารช่วยในการเชื่อมโยง และใช้คาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive carbons) เป็นสารให้สีและให้สมบัติการนำไฟฟ้า โดยเลือกใช้แกรไฟต์ (Graphite) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide : RGO) โดยที่ RGO เตรียมได้จากการนำแกรไฟต์มาสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีโดยปรับปรุงจากวิธีของฮัมเมอร์ (Hummers' method) RGO ที่เตรียมได้นำไปตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy เพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง และใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) เพื่อหาโครงสร้างผลึก และศึกษาขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital microscope) โดยน้ำมันผสมสูตรที่ใช้อัตราส่วนน้ำมันถั่ว : น้ำมันลินสีด เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก (สูตร T1L1) เป็นสูตรที่เหมาะสมต่อการนำมาเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์ และได้ศึกษาสมบัติลักษณะพื้นผิว และค่าสภาพความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance : R_s) ของหมึกพิมพ์ที่มีปริมาณแกรไฟต์ที่แตกต่างกันในแต่ละสูตร พบว่าสูตร T1L1G8 เป็นสูตรที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ และมีค่า R_s ต่ำที่สุด จึงนำมาปรับสูตรโดยการแทนที่แกรไฟต์บางส่วนด้วยการเติม RGO ลงไปในหมึกพิมพ์ พบว่าค่า R_s มีค่าต่ำลงเมื่อมีอัตราส่วนในการใช้ RGO เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์ และจำลองการใช้งานด้วยการประกอบวงจรไฟฟ้า โดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร

คำสำคัญ : คาร์บอนนำไฟฟ้า น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ น้ำมันลินสีด น้ำมันถั่ว ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Preparation of Conductive Inks from Epoxidized Soybean Oil and Epoxidized Natural Rubber Containing Conductive Carbons
Student Name	Miss Pinyalak Wisetraksakun
Student ID	59605035
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade

Abstract

This study aimed to prepare the soy-based conductive inks from the recipe including epoxidized soybean oil (ESO) and epoxidized natural rubber (ENR). Drying oils (linseed oil and tung oil) were used to enhance film forming of the ink, and conductive carbons e.g. graphite and reduced graphene oxide (RGO) were used as colorant and conductive particles. RGO was synthesized by chemical reaction of graphite which modified from Hummers method. The received RGO was analyzed by FTIR Spectroscopy to identify its functional groups on the structure. The lattices were explained by XRD pattern and the particle sizes were measured by digital optical microscope. From the results, T1L1 was the most suitable mixed oil recipe and was selected to prepare the conductive ink. The conductive patterns were studied on sheet resistance (R_s) and surface. It was found that T1L1G8 was the lowest R_s and smooth surface, thus, this formula was selected to modify by partially replacement of graphite by RGO. The results showed that the sheet resistance decreased when the higher content of RGO was applied. The simple model of circuit including LED and the prepared conductive printing sheet was set up to confirm the electrical conductivity.

Keywords : Conductive carbon, Epoxidized soybean oil, Linseed oil, Tung oil, Epoxidized natural rubber, Conductive ink

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และข้อชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนอบรมให้มีการทำงานอย่างมีความเป็นระเบียบรอบคอบ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือและตรวจทานการดำเนินงานวิจัยนี้ ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากกับงานวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และอนุเคราะห์ในการใช้ชุดเครื่องทดสอบ 4-point probe

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ครอบครัวที่มอบโอกาสที่ดีในการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนพี่และน้อง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัยนี้ พร้อมทั้งให้กำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษา และให้ทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนในการเสนอผลงานทางวิชาการ

สุดท้ายนี้ประโยชน์และความรู้อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแต่ ครอบครัว ผู้มีพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน และบุคคลที่มีส่วนสนับสนุนอีกมากมายที่ยังมิได้กล่าวถึง ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง หากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า (Conductive inks).....	4
2.2 คาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive carbons).....	4
2.2.1 แกรไฟต์ และ แกรฟีน.....	6
2.2.2 การสังเคราะห์แกรฟีน.....	7
2.3 น้ำมันธรรมชาติ (Natural oils).....	10
2.3.1 น้ำมันลินสีด (Linseed oil).....	11
2.3.2 น้ำมันทัง (Tung oil).....	13
2.3.3 น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oil, ESO).....	14
2.4 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR).....	16
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติอีพอกไซด์.....	16
2.4.2 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์.....	17
2.4.3 การประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์.....	17
2.5 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยวิธีเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe method).....	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 สารเคมี.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	25
3.3 การเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO).....	26
3.4 การเตรียมสารละลายยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์.....	26
3.5 การเตรียมสูตรน้ำมันผสม.....	27
3.6 การเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์.....	27
3.7 การเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์ร่วมกับ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์.....	27
3.8 วิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	28
3.8.1 ชิ้นงานสำหรับศึกษาการแห้งผิว.....	28
3.8.2 ชิ้นงานสำหรับศึกษาพื้นผิว, สมบัติการนำไฟฟ้า และความต้านทานน้ำ ของหมึกพิมพ์.....	29
3.9 การตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า.....	29
3.9.1 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).....	29
3.9.2 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD).....	29
3.9.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา.....	30
3.10 การทดสอบสมบัติของน้ำมันผสม: การแห้งผิวของน้ำมันผสม.....	30
3.11 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	30
3.11.1 การแห้งผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์.....	30
3.11.2 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าภายหลังการฉายรังสี UV.....	30
3.11.3 สมบัติทางไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	30
3.11.4 ความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	31
3.11.5 การจำลองการประกอบวงจรโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เป็นส่วนประกอบของวงจร.....	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	33
4.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า.....	33
4.2 ผลของน้ำมันชักแห้งต่อการแห้งของสูตรน้ำมันผสม.....	37
4.3 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ศึกษาเวลาในการแห้งผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	40
4.3.2 ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์ที่ถูกทำให้แห้ง.....	42
4.3.3 ปริมาณเกรไฟต์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า.....	44
4.4 ผลของการใช้รีดิวซ์เกรฟีนออกไซด์.....	46
4.4.1 ปริมาณรีดิวซ์เกรฟีนออกไซด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์.....	46
4.4.2 ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้เกรไฟต์ร่วมกับ รีดิวซ์เกรฟีนออกไซด์.....	48
4.4.3 ศึกษาความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์ที่แห้งแล้ว.....	50
4.5 การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เป็นส่วนประกอบของวงจร.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	65
ภาคผนวก ค.....	67
ภาคผนวก ง.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของน้ำมันลิตส์ด.....	12
2.2 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันลิตส์ด.....	12
2.3 สมบัติบางประการของน้ำมันทั้ง.....	14
2.4 ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้ง.....	14
2.5 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันถั่วเหลือง.....	15
2.6 สมบัติเด่น และ การใช้งานทางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์.....	17
3.1 สมบัติของน้ำมันถั่วเหลืองอิพอกซีไดซ์.....	24
3.2 สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์.....	24
3.3 สัดส่วนของสารละลาย ENR, น้ำมันทั้ง และ น้ำมันลิตส์ด ในสูตรน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ.....	27
3.4 สัดส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ ในสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	28
4.1 ระดับการแห้งที่ผิวของชิ้นงานน้ำมันผสมเมื่อผ่านการฉาย UV ที่เวลาต่าง ๆ	40
4.2 ระดับการแห้งที่ผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเมื่อผ่านการฉาย UV ที่เวลาต่าง ๆ	41
4.3 ค่าสภาพต้านทาน (R) และสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Rs) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์.....	45
4.4 ค่าสภาพต้านทาน (R) และสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Rs) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ร่วมกับรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์.....	48
4.5 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ.....	51
4.6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 3, 5 และ 10 นาที.....	52
ค 1 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G6 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	67
ค 2 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G8 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	67
ค 3 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G7.5R0.5 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	68
ค 4 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G7.0R1.0 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	68
ค 5 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G6.0R2.0 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	69
ง 1 ค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ.....	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การไฮบริไดซ์ของคาร์บอน.....	5
2.2 อัญรูปของคาร์บอน.....	5
2.3 โครงสร้างของแกรไฟต์.....	6
2.4 อัญรูปต่าง ๆ ที่มีอัญรูปพื้นฐานจากแกรไฟน์ โดยเมื่อแผ่นแกรไฟน์ถูกห่อ, ม้วน และซ้อนกัน ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของฟูลเลอร์, ท่อนาโนคาร์บอน และแกรไฟต์ ตามลำดับ.....	7
2.5 การสังเคราะห์แกรไฟน์ด้วยวิธี Micromechanical cleavage.....	7
2.6 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรไฟน์.....	8
2.7 วิธีการสังเคราะห์แกรไฟน์จากแกรไฟต์.....	9
2.8 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์.....	10
2.9 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันลินสีด (ก) กรดปาล์มมิติก, (ข) กรดไมริสติก, (ค) กรดโอเลอิก, (ง) กรดลิโนเลอิก และ (จ) กรดลิโนเลนิก.....	13
2.10 โครงสร้างของกรดแอลฟาอีลีโอสเตอริก.....	14
2.11 โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 100 เปอร์เซนต์..	15
2.12 ปฏิกริยาอีพอกซีเดชันบนพันธะคู่ของน้ำมันถั่วเหลือง.....	15
2.13 กระบวนการผลิตยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์.....	17
2.14 การวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.....	18
2.15 แบบจำลองภาพตัดขวางของกระแสไฟฟ้าที่แทรกเข้าไปใน ก) ชิ้นงานหนา และ ข) ชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง.....	19
3.1 แบบพิมพ์แผ่นใสที่มีช่องว่างขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร.....	29
3.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน (I) กับความต่างศักย์ (V)...	31
3.3 แบบจำลองการต่อวงจร.....	32
4.1 FTIR สเปกตรัมของแกรไฟต์, แกรไฟน์ออกไซด์ และรีดิคซ์แกรไฟน์ออกไซด์.....	34
4.2 แบบจำลองการสังเคราะห์ XGO และ RGO.....	35
4.3 XRD pattern แกรไฟต์ และ RGO.....	35
4.4 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาค ก) แกรไฟต์ และ ข) รีดิคซ์แกรไฟน์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า.....	36
4.5 แบบจำลองการเกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่ง allylic บนโครงสร้างของโครงสร้าง ก) ESO, ข) น้ำมันทั้ง, ค) น้ำมันลินสีด และ ง) ENR.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงแบบอนุโมลติสระ ระหว่าง ESO, ENR, น้ำมันทั้ง และน้ำมันลินสีด เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง ก) -C-C-, ข) -C-O-O-C- และ ค) -C-O-C-	38
4.7 ระดับการแห้งที่ผิวของน้ำมันผสม.....	39
4.8 ระดับการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	41
4.9 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่กำลังขยาย 60 เท่า ก) – จ) และที่กำลังขยาย 500 เท่า ฉ) –ญ) ของสูตร T1L1, T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8.....	43
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (V) ของสูตร ก) T1L1G6 และ ข) T1L1G8.....	45
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (V) ของสูตร ก) T1L1G7.5R0.5 ข) T1L1G7.0R1.0 และ ค) T1L1G6.0R2.0.....	47
4.12 กราฟแห่งเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Rs) ของหมึกพิมพ์สูตรต่าง ๆ.....	48
4.13 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกนำไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่กำลังขยาย 60 เท่า ก) – ค) และที่กำลังขยาย 500 เท่า ง) –ฉ) ของสูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0.....	49
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสกับเวลาของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตร T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0.....	51
4.15 ตัวอย่างการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยใช้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร และใช้ถ่านไฟฉาย 9V.....	53
ก 1 รูปถ่ายอนุภาคแกรไฟต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 500 เท่า.....	63
ก 2 รูปถ่ายอนุภาคครีติวซ์แกรไฟท์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 500 เท่า...	64
ข 1 ชิ้นงานน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบการแห้งที่ผิว เมื่อได้รับรังสี UV ที่เวลาแตกต่างกัน.....	65
ข 2 ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบการแห้งที่ผิว เมื่อได้รับรังสี UV ที่เวลาแตกต่างกัน.....	66
ง 1 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G8 จากชิ้นงาน 3 ชิ้น ที่เวลาต่าง ๆ.....	70
ง 2 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G7.5R0.5 จากชิ้นงาน 3 ชิ้น ที่เวลาต่าง ๆ.....	71
ง 3 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G7.0R1.0 จากชิ้นงาน 3 ชิ้น ที่เวลาต่าง ๆ.....	72
ง 4 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G6.0R2.0 จากชิ้นงาน 3 ชิ้น ที่เวลาต่าง ๆ.....	73

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	ความหมาย
ESO	Epoxidized soybean oil
ENR	Epoxidized natural rubber
XGO	Exfoliated graphene oxide
RGO	Reduced graphene oxide
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
XRD	X-Ray Diffraction



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

หมึกนำไฟฟ้า (Conductive ink) ถือเป็นความก้าวหน้าในการพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็น การรวมการพิมพ์แบบดั้งเดิม (เช่น การพิมพ์สกรีน, กราเวียร์, เฟลทโซ, ออฟเซต, และอิงค์เจท) [1] ร่วมกับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การประยุกต์ใช้งานของหมึกนำไฟฟ้า เช่น ใช้สำหรับสร้าง วงจรไฟฟ้า, การพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์บนพื้นผิวที่มีความยืดหยุ่น, อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และ อุปกรณ์ส่งสัญญาณโดยระบบสัมผัส [1] หมึกนำไฟฟ้าที่จำหน่ายในท้องตลาดนั้นมักอยู่ในฐานของตัว ทำละลาย โดยอาศัยการระเหยของตัวทำละลายเพื่อให้หมึกแห้งได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีข้อเสีย คือ มีกลิ่นเหม็น, ก่อให้เกิดอันตรายต่อตัวผู้ใช้ และเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีหมึกนำไฟฟ้าฐานน้ำ ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวกลางเพื่อลดการใช้ตัวทำละลาย แต่พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม เช่น หมึกพิมพ์จากพอลิอะคริลิกในรูปอิมัลชัน [2] และน้ำอาจระเหยได้ง่าย ทำให้เนื้อหมึกแห้งตัวก่อน การใช้งาน

ส่วนประกอบที่สำคัญของหมึกนำไฟฟ้าคืออนุภาคที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี เช่น เงิน, ทอง, ทองแดง, และ อะลูมิเนียม [3] แต่วัสดุเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูง และ โลหะบางชนิดอาจเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าต่ำลง เช่น การเกิด Al_2O_3 ที่ผิวของอะลูมิเนียม [1] ในปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้วัสดุอื่นที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และยังเป็น การลดต้นทุนในการผลิต หนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการใช้คาร์บอนนำไฟฟ้า เช่น แกรไฟต์ และแกรฟีน เป็นต้น [4]

แกรไฟต์ และแกรฟีนมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่โดดเด่น เนื่องจากโครงสร้างมีอิเล็กตรอนอิสระที่ สามารถเคลื่อนที่ผ่านทั่วทั้งอนุภาค [5] ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของวัสดุ โดยในงานด้านหมึกพิมพ์มี การศึกษาการใช้อนุภาคของเขม่าดำ/แกรไฟต์ [6] และแกรไฟต์/แกรฟีน [4] ซึ่งพบว่าการใช้อนุภาค แกรฟีนและแกรไฟต์ส่งผลทำให้การนำไฟฟ้าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อนุภาคแกรฟีนในหมึก พิมพ์ ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า และเหมาะกับการพิมพ์ลงบนวัสดุที่ต้องการความยืดหยุ่น หรือ งานที่อาจเกิดการโค้งงอได้ [7]

ส่วนประกอบที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งในหมึก คือ สารที่ช่วยยึดอนุภาคนำไฟฟ้าให้มีความต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งควรเกิดเป็นฟิล์มที่แห้งหลังจากที่ทาลงบนวัสดุที่ใช้พิมพ์แล้ว นอกเหนือจากหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย และฐานน้ำ ซึ่งมีการใช้ตัวทำละลาย และผลิตภัณฑ์จาก ปิโตรเลียม ยังมีการวิจัยหมึกพิมพ์ที่ผลิตโดยใช้น้ำมันถั่วเหลือง [35] ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน เนื่องจากการลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นอันตราย โดยในท้องตลาด นั้นมีเพียงหมึกพิมพ์จากน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้ในการพิมพ์หนังสือพิมพ์ และหมึกออฟเซตเท่านั้น ดังนั้น การเลือกน้ำมันถั่วเหลืองเพื่อใช้สำหรับหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมหมึกนำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ (ESO) ร่วมกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (ENR) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ และ ไม่มีความเป็นพิษ และใช้อนุภาคแกรไฟต์ และ/หรือ แกรฟีน เป็นสารที่ก่อให้เกิดการนำไฟฟ้า โดยอาศัยการเชื่อมโยงของ ESO และ ENR ในการทำให้เกิดฟิล์มของหมึกพิมพ์ เสริมด้วยการใช้น้ำมันชักแห้ง ได้แก่ น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง เพื่อช่วยให้การแห้งของหมึกมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้า, การยึดติดระหว่างอนุภาคกับฟิล์มที่สร้างขึ้น, และการยึดติดระหว่างหมึกกับวัสดุที่ใช้พิมพ์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าฐานน้ำมันถั่วเหลืองที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ และ/หรือ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์
- 2) เพื่อศึกษาการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์, ลักษณะของพื้นผิว และความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มหมึกพิมพ์
- 3) เพื่อพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าที่มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และลดปริมาณการปลดปล่อยสารที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์
- 2) ตรวจสอบวิเคราะห์เอกลักษณ์แกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์
- 3) ศึกษาระยะเวลาในการแห้งที่ผิวของสูตรน้ำมันผสม เพื่อเลือกใช้เป็นสูตรตั้งต้นในการใช้เตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า
- 4) เตรียมหมึกนำไฟฟ้าจาก ESO ร่วมกับ ENR และน้ำมันชักแห้ง โดยใช้แกรไฟต์ และ/หรือ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นอนุภาคนำไฟฟ้า โดยศึกษาผลของสัดส่วนขององค์ประกอบ ดังนี้
 1. สัดส่วนของน้ำมันชักแห้ง
 2. สัดส่วนของอนุภาคนำไฟฟ้าต่อน้ำมันผสม
 3. สัดส่วนของแกรไฟต์ และ/หรือ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์
- 5) ตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติของหมึกนำไฟฟ้า
 1. ระยะเวลาการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า
 2. ลักษณะพื้นผิว และสภาพความต้านทานน้ำของฟิล์มหมึกพิมพ์
 3. สมบัติการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมหมึกนำไฟฟ้าฐานน้ำมันถั่วเหลือง ที่มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า (Conductive inks)

อิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์ (Printed Electronic, PE) เป็นการสร้างวงจร และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยการพิมพ์หมึก หรือพอลิเมอร์ โดยวิธีการพิมพ์มีความคล้ายกับการพิมพ์แบบดั้งเดิม เช่น การพิมพ์แบบออฟเซต (Offset), การพิมพ์อิงค์เจต (inkjet) และการพิมพ์สกรีน (Screen printing) เป็นต้น ลงไปบนวัสดุต่าง ๆ [1] แต่มีความต่าง คือ หมึกพิมพ์ที่ใช้เป็นหมึกที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า เมื่อถูกพิมพ์ลงบนวัสดุแล้วต้องผ่านกระบวนการฉายแสงหรือได้รับความร้อน [4] ผลิตภัณฑ์ไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์ลงบนวัสดุที่มีความยืดหยุ่นได้ และมีราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า [8, 9]

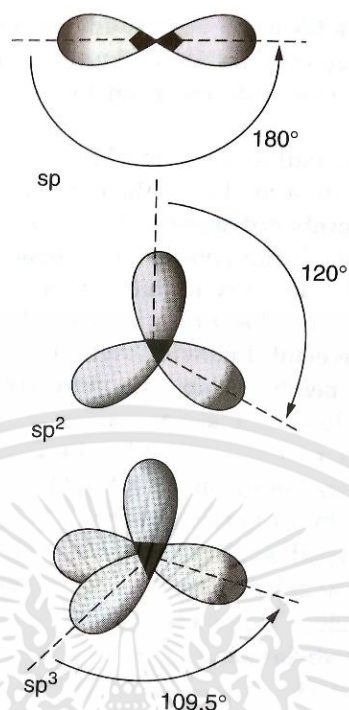
การพัฒนาหมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีผลต่อการพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์ [10] เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์มีการใช้งานเฉพาะทาง เช่น แผงวงจร (Electrical circuit), การตรวจวิเคราะห์โรค (Health diagnostics), หน้าจอแสดงผลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic display), ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage), และใช้ในงานด้านความมั่นคงทางอาหาร (Food security) [11]

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นความก้าวหน้าของเทคโนโลยีหมึกพิมพ์ วัสดุที่ใช้พิมพ์มีสมบัติในการนำไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วมักมีการเติมอนุภาค หรือวัสดุนำไฟฟ้าลงไปเป็นส่วนประกอบของหมึก นิยมใช้อนุภาคโลหะ เช่น เงิน (Silver), ทองแดง (Copper), นิกเกิล (Nickel), และอะลูมิเนียม (Aluminium) เป็นต้น เงินเป็นตัวเลือกแรกที้นำมาใช้ เนื่องจากมีการนำไฟฟ้าสูง และมีประสิทธิภาพดี แต่ด้วยเงินมีราคาแพงจึงมีการใช้วัสดุอื่นที่มีราคาต่ำกว่า ได้แก่ ทองแดง, อะลูมิเนียม และสังกะสี แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของวัสดุเหล่านี้คือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ที่อุณหภูมิห้อง เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ของออกไซด์ของโลหะที่ผิวของอนุภาค [12] ทำให้มีการนำไฟฟ้าที่ลดลง และเป็นข้อจำกัดของการใช้อนุภาคเหล่านี้ในสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า [4] ต่อมามีการใช้คาร์บอนซึ่งมีสมบัติในการนำไฟฟ้าแทนอนุภาคโลหะเพื่อแก้ไขปัญหา

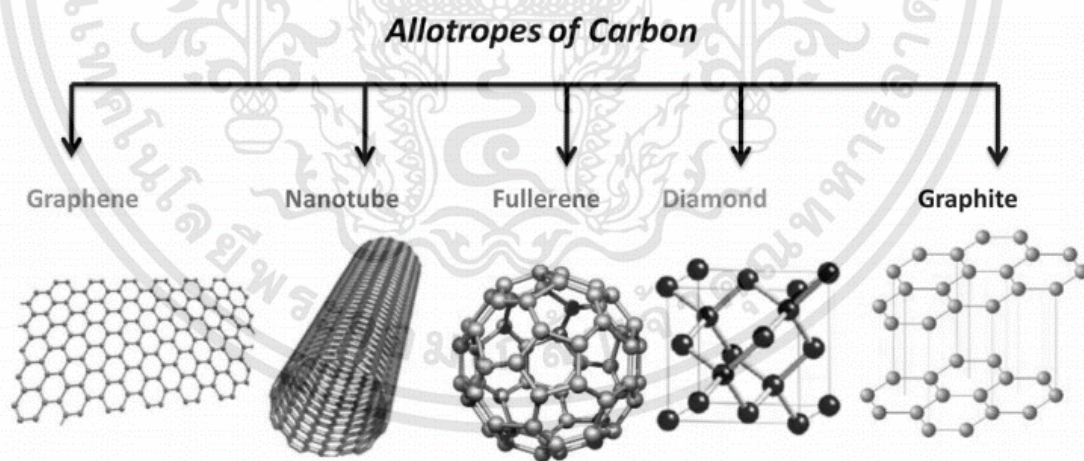
2.2 คาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive carbons) [13, 14]

อะตอมคาร์บอนเป็นธาตุลำดับที่ 6 ในตารางธาตุ และ เป็นธาตุลำดับแรกของหมู่ IV ประกอบไปด้วย 6 อิเล็กตรอน ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 ที่สามารถเกิดไฮบริไดเซชัน (Hybridizations) ได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ sp , sp^2 , และ sp^3 แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยอัญรูป (Allotrope) พื้นฐานของผลึกคาร์บอน ได้แก่ แกรฟีน (Graphene), แกรไฟต์ (Graphite), ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube), ฟูลเลอร์เร็น (Fullerene), และเพชร (Diamond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การไฮบริไดซ์ของคาร์บอน [14]

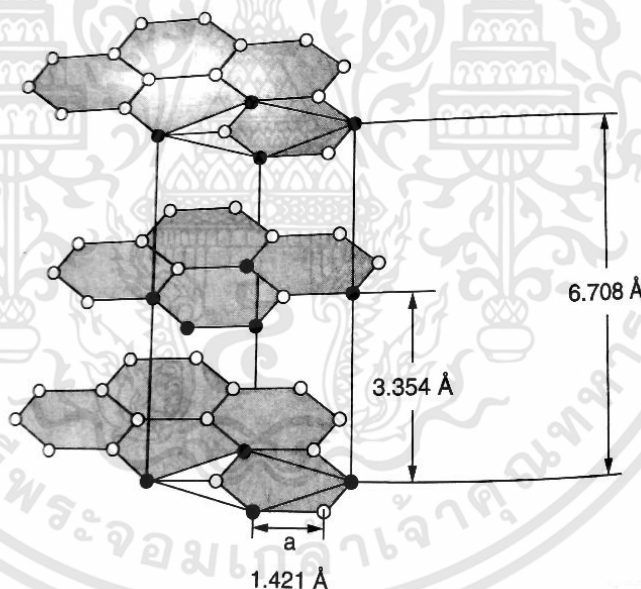


รูปที่ 2.2 อัญรูปของคาร์บอน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 แกรไฟต์ และ แกรฟีน [5, 13-14, 16]

แกรไฟต์ (Graphite) มีโครงสร้างที่เป็นโครงตาข่าย 3 มิติที่เกิดจากอะตอม โดยแต่ละอะตอมคาร์บอนเกิดไฮบริดไชน์แบบ sp^2 กับ คาร์บอน 3 อะตอมข้างเคียง ด้วยพันธะโควาเลนต์ เกิดเป็นชั้น (Graphene layer) ที่มีความแข็งแรง ซึ่งมีรูปร่าง 6 เหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง ส่วนอิเล็กตรอนที่เหลืออีก 1 อิเล็กตรอนในออร์บิทัล p อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบซึ่งไม่ถูกไฮบริดไชน์ เกิดการซ้อนเหลื่อมกับออร์บิทัลของคาร์บอนอะตอมถัดไปทำให้เกิดอันตรกิริยาต่อกัน เกิดออร์บิทัลโมเลกุลชนิดไพ (pi-bond) หรือ ออร์บิทัลโมเลกุลไม่ประจำที่ (Delocalized molecular orbitals) ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัลเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หรือ อิเล็กตรอนไม่ประจำที่ (Delocalized electron) การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปมาระหว่างอะตอม คล้ายกับพันธะโลหะ ทำให้แกรไฟต์สามารถนำไฟฟ้าได้บนระนาบ (x-y direction) โดยแต่ละระนาบถูกยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) ในแกน z ซึ่งไม่แข็งแรง สามารถแยกแต่ละระนาบออกจากกันได้ง่าย เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างระนาบมาก (3.35 Å) โครงสร้างของแกรไฟต์แสดงดังรูปที่ 2.3 และหากทำการแยกระนาบออกจากโครงสร้างเป็นระนาบเดี่ยว ๆ จะเรียกระนาบนั้นว่า แกรฟีน (Graphene)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแกรไฟต์ [14]

แกรฟีน (Graphene) คือ ชั้นของอะตอมคาร์บอนที่เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม อาจกล่าวได้ว่า แกรฟีนเป็นชั้นของระนาบเดี่ยว ๆ ของแกรไฟต์ โดยแกรฟีนมีความหนาเท่ากับ คาร์บอน 1 อะตอม หรือเท่ากับ 0.335 nm ซึ่งเป็นอัตราพื้นฐานของสารประกอบคาร์บอนอื่น คือ หากนำแกรฟีนต่อกันเป็นชั้น ๆ ทำให้เกิดโครงสร้างของแกรไฟต์ แต่ถ้านำมาม้วนเป็นทรงกระบอกจะเกิดเป็นวัสดุที่เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอน และหากนำมาห่อให้เกิดเป็นทรงกลมจะเรียกโครงสร้างที่เกิดขึ้นนี้ว่า ฟูลเลอร์ีน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

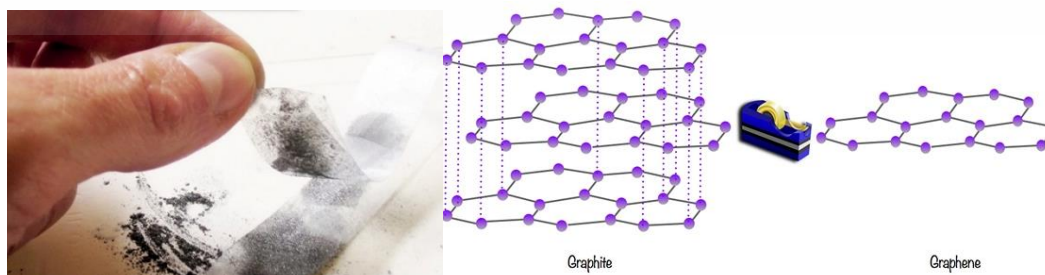
โครงสร้างของแกรฟีนมีอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้แกรฟีนเป็นโมเลกุลที่มีสมบัติการนำไฟฟ้า

2.2.2 การสังเคราะห์แกรฟีน

ในปี ค.ศ. 2004 ศ.ดร. อังเดร ไกม์ (Andre Geim) และ ศ.ดร. คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) สามารถแยกแกรฟีนที่มีความหนาหนึ่งชั้นอะตอมได้สำเร็จ โดยทำการแยกชั้นแกรฟีนจากแกรไฟต์โดยวิธี Micromechanical cleavage (รูปที่ 2.5) หรือการใช้เทปกาวทาบบนแกรไฟต์แล้วลอกออก แล้วทำเช่นนี้ซ้ำ ๆ โดยในแต่ละครั้งแผ่นแกรไฟต์ที่ติดขึ้นมาทับเทปกาวมีความบางลงเรื่อย ๆ จนได้แผ่นที่บางที่สุด ซึ่งผลงานนี้ทำให้ทั้งสองท่านได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2010 [16]



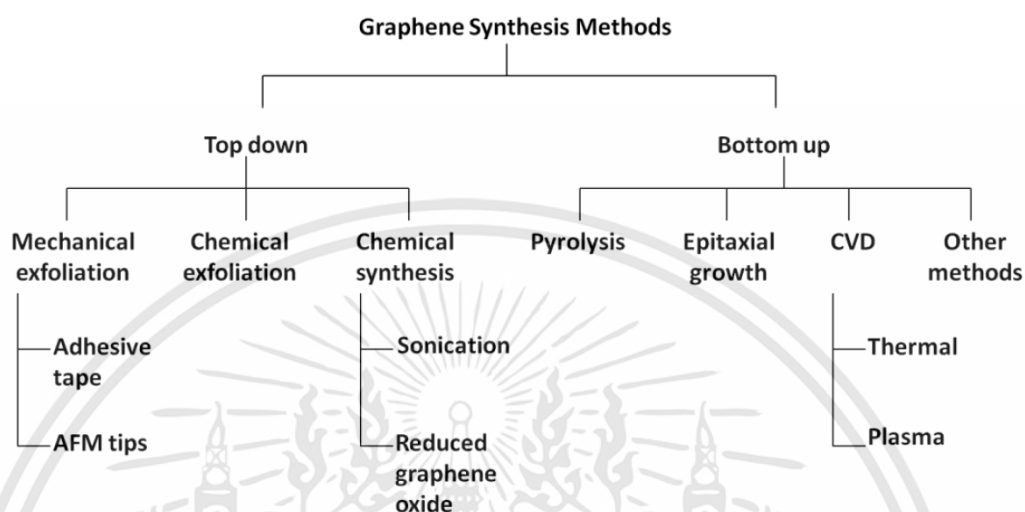
รูปที่ 2.4 อัญรูปต่าง ๆ ที่มีอัญรูปพื้นฐานจากแกรฟีน โดยเมื่อแผ่นแกรฟีนถูกห่อ, ม้วน และซ้อนกัน ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของฟูลเลอร์ริน, ท่อนาโนคาร์บอน และแกรไฟต์ ตามลำดับ [17]



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธี Micromechanical cleavage [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการสังเคราะห์แกรฟีนสามารถทำได้หลายวิธี โดยแบ่งการสังเคราะห์ออกเป็น 2 วิธีการใหญ่ ๆ คือ การสังเคราะห์จากใหญ่ไปเล็ก หรือบนลงล่าง (Top-down) และการสังเคราะห์จากเล็กไปใหญ่ หรือล่างสู่บน (Bottom-up) [19, 20] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรฟีน [19]

กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างแบ่งเป็นการลอก (Exfoliation) แผ่นแกรฟีนจากโครงสร้างแกรไฟต์ได้โดยตรงทั้งจากการใช้แรงเชิงกล และการใช้วิธีทางเคมีช่วยให้เกิดการลอกชั้นแกรฟีนได้ง่ายขึ้น ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส, การสร้างชั้นเอพิแทกซี, การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยไอระเหยทางเคมี (CVD) เป็นต้น ซึ่งวิธีการกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บนจะเป็นวิธีที่ซับซ้อน ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง แต่ให้แกรฟีนในปริมาณมาก นิยมทำในระดับอุตสาหกรรม ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างสามารถทำได้ง่ายกว่า เหมาะสำหรับการเตรียมในระดับห้องปฏิบัติการและงานวิจัย

1) การหลุดลอกออกด้วยวิธีการเชิงกล (Mechanical exfoliation) [20]

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าแกรไฟต์เกิดจากการซ้อนทับกันของแกรฟีน และยึดแต่ละชั้นอย่างอ่อน ๆ ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งมีพลังงานพันธะระหว่างชั้นแกรฟีน เท่ากับ 2 eV/nm^2 และแรงที่ต้องใช้ในการแยกชั้นแกรฟีนออกจากแกรไฟต์มีค่าประมาณ $300 \text{ nN/}\mu\text{m}^2$ [21] โดยทำการลอกชั้นแกรฟีนด้วยวิธีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเทปกาว หรือการแยกแกรไฟต์โดยใช้ปลายหัวอ่านของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM) [22] และถ่ายโอนชั้นแกรไฟต์บาง ๆ ที่แยกออกมาได้ลงบนตัวรองรับ (Substrate) โดยข้อเสียของวิธีการเชิงกล คือ 1) แกรฟีนที่ได้มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งเพียงพอสำหรับงานวิจัยที่ต้องการใช้แกรฟีนในปริมาณน้อย แต่ไม่เพียงพอสำหรับงานวิจัยที่จำเป็นต้องมีการสร้างอุปกรณ์หรือนำไปใช้ในงานระดับอุตสาหกรรม 2) แกรฟีนที่ได้ไม่ใช่แกรฟีนที่มีจำนวนชั้นเดียว ๆ ทั้งหมด แต่ยังคงมีแกรฟีนที่มีจำนวนชั้นหลายชั้น (แกรไฟต์) ปะปนอยู่

3) โอกาสในการได้แกรฟีนที่มีโครงสร้างคล้ายกันมีอยู่น้อยมาก

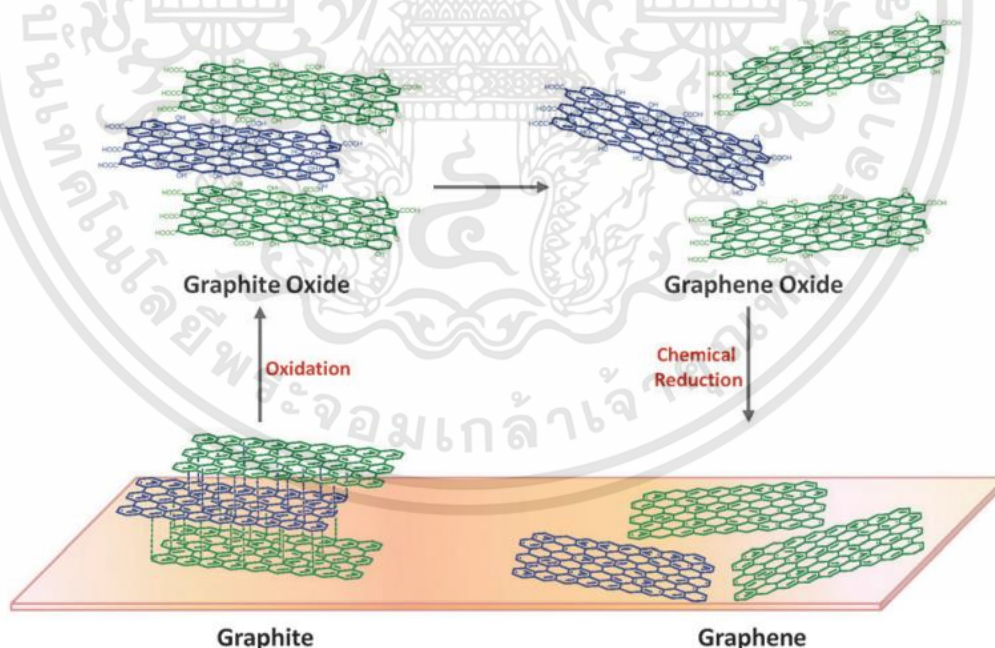
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การหลุดลอกออกด้วยวิธีทางเคมี (Chemical exfoliation) [20]

การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีหลุดลอกออกทางเคมีทำให้ได้แกรฟีนที่อยู่ในรูปของสารละลาย โดยการใส่โลหะอัลคาไลน์เข้าไปแทรกอยู่ (Intercalation) ระหว่างชั้นแกรฟีนของโครงสร้างแกรไฟต์ เพื่อให้เกิดการหลุดลอกของชั้นแกรฟีนออกมา โดยข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ได้แกรฟีนที่ยังไม่เป็นแกรฟีนที่บริสุทธิ์ เนื่องจากยังมีส่วนโครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ปะปนอยู่ และยังมีสารเคมีตกค้างอีกด้วย

3) การสังเคราะห์ทางเคมี (chemical synthesis) [20]

การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีการนี้เป็นที่นิยม เนื่องจากมีกระบวนการที่ค่อนข้างง่าย และไม่ซับซ้อน กระบวนการในวิธีนี้ คือ แกรไฟต์ถูกออกซิไดซ์ด้วยกรดแก่ และออกซิแดนท์ เพื่อให้ได้เป็นแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับแกรไฟต์บริสุทธิ์ จากนั้นทำการอัลตราโซนิก (Sonication) โดยขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อให้แกรไฟต์ออกไซด์แต่ละชั้นหลุดออกเป็นแผ่นแกรฟีนออกไซด์และกระจายอยู่ในตัวทำละลาย หลังจากนั้นจึงทำการรีดิวซ์ให้กลับเป็นแกรฟีน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 การทำอัลตราโซนิกอาจทำให้แกรฟีนที่ได้มีขนาดเล็กลง และอาจเกิดข้อบกพร่องในโครงสร้างผลึกที่ได้ด้วย ซึ่งปกติแล้วแผ่นแกรฟีนขนาดใหญ่และปราศจากความบกพร่องในโครงสร้างของผลึกมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า

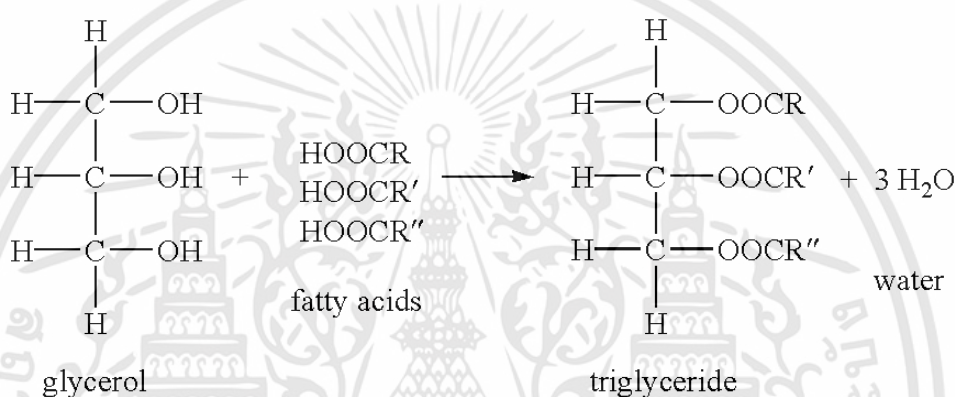


รูปที่ 2.7 วิธีการสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรไฟต์ [23]

2.3 น้ำมันธรรมชาติ (Natural oils) [24]

ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันจากธรรมชาติในการเตรียมวัสดุพอลิเมอร์ทดแทนวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เนื่องด้วยสาเหตุจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และนอกจากนี้ น้ำมันธรรมชาติยังเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นได้ในระยะเวลาสั้น ๆ

น้ำมันธรรมชาติเป็นสารไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มลิพิด (Lipid) มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง มีโครงสร้างทางเคมีเป็นหมู่เอสเทอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) กับกรดไขมัน (Fatty acid) แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยที่หมู่ R, R' และ R'' โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน 13-21 อะตอม



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ [25]

น้ำมันไตรกลีเซอไรด์มีส่วนของกรดไขมันประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ซึ่งกรดไขมันเป็นสารที่มีองค์ประกอบของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ต่อกับสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันส่งผลต่อสมบัติ และการแห้งตัวของน้ำมัน ชนิดของกรดไขมันสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid)

กรดไขมันอิ่มตัวเป็นโครงสร้างที่ไม่มีพันธะคู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ต่อจากหมู่คาร์บอกซิลิก ดังนั้น ไขมันที่มีโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโครงสร้าง มีสมบัติไม่แห้งตัว เช่น กรดไมริสติก (Myristic acid), กรดปาล์มิติก (Palmitic acid), และกรดสเตียริก (stearic acid) เป็นต้น

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid)

กรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นโครงสร้างที่มีพันธะคู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ 1 พันธะขึ้นไป เช่น กรดโอเลอิก (Oleic acid), กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid), และกรดลิโนเลนิก (Linolenic acid) เป็นต้น โดยในกรดไขมันที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 ตำแหน่ง และมีโครงสร้างแบบพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เรียกว่า Conjugated ส่วนโครงสร้างของพันธะคู่ที่อยู่ห่างกัน เรียกว่า Non-conjugated

ความแตกต่างของกรดไขมันแต่ละชนิด ขึ้นกับจำนวน และตำแหน่งของพันธะคู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติที่แตกต่างกันของน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ หากมีพันธะคู่มากทำให้การแห้งตัวของน้ำมันเร็วขึ้น และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมีโครงสร้างที่เป็น Conjugated ช่วยเสริมการแห้งตัวให้เร็วมากยิ่งขึ้น โดยปริมาณพันธะคู่ในโครงสร้าง หรือ ค่าองศาความไม่อิ่มตัวบอกได้จากการวัดค่าไอโอดีน (Iodine value) ซึ่งเป็นการหาปริมาณไอโอดีน (มิลลิกรัม) ที่ทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมัน 100 กรัม ทำให้สามารถแบ่งน้ำมันตามค่าไอโอดีนได้เป็น 3 ชนิด คือ น้ำมันแห้งเร็ว (Drying oils), น้ำมันแห้งช้า (Semi-drying oils), และ น้ำมันไม่แห้ง (Non-drying oils)

1) **น้ำมันแห้งเร็ว หรือ น้ำมันชักแห้ง (Drying oils)** มีค่าไอโอดีนมากกว่า 130 ซึ่งมีการแห้งตัวที่เร็วที่สุด โดยโครงสร้างไม่อิ่มตัวของกรดไขมันสามารถจับกับออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปลี่ยนน้ำมันจากของเหลวเป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง มีสมบัติทนทานสารเคมี และตัวทำละลายกลุ่มที่ละลายน้ำมันได้ และทนต่อการซึมผ่านของความชื้น น้ำมันชนิดนี้มักประกอบด้วยกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 3 พันธะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง เป็นต้น

2) **น้ำมันแห้งช้า (Semi-drying oils)** มีค่าไอโอดีน 90-130 โครงสร้างที่เป็นพันธะคู่ของน้ำมันชนิดนี้สามารถจับกับออกซิเจนในอากาศได้น้อย และเกิดเป็นฟิล์มได้ช้ากว่าน้ำมันแห้งเร็ว มีพันธะคู่ 2 พันธะต่อสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน (Sunflower oil) เป็นต้น

3) **น้ำมันไม่แห้ง (Non-drying oils)** มีค่าไอโอดีนน้อยกว่า 90 น้ำมันชนิดนี้ไม่สามารถแห้งตัวได้ เนื่องจากส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว หรือมีโครงสร้างที่เป็นพันธะคู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนในปริมาณน้อย นิยมใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สำหรับเรซินที่ใช้เป็นสารยึดเกาะในแลกเกอร์ เช่น น้ำมันละหุ่ง (Castor oil) เป็นต้น

น้ำมันธรรมชาติที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์, น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง

2.3.1 น้ำมันลินสีด (Linseed oil)

ลินสีด หรือชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Linum usitatissimum* สามารถใช้ประโยชน์จากลินสีดได้สองประเภท ดังนี้

1) เส้นใยจากลำต้น ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสิ่งทอ (Fabrics) เช่น ผ้าลินิน (Linen), เชือก (Twines), ผ้าใบ (Canvas), และวัสดุกันความร้อน เป็นต้น

2) น้ำมันจากเมล็ด โดยการนำเมล็ดมาผ่านกระบวนการสกัดให้อยู่ในรูปของน้ำมัน ซึ่งเมล็ดลินสีดมีปริมาณน้ำมันประมาณ 35-50 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันลินสีดจัดเป็นประเภทน้ำมันแห้งเร็ว หรือน้ำมันชักแห้ง จึงนำไปใช้เป็นส่วนผสมในสี, น้ำมันชักเงา, น้ำมันเคลือบไม้, หมึกพิมพ์, ผ้าพลาสติก, น้ำมันพอกหนัง, จารบี และสารหล่อลื่น เช่น ผสมกับน้ำมันสน, น้ำมันตะกั่วดำ เป็นต้น

2.3.1.1 การสกัด และ สมบัติของน้ำมันลินสีด

กระบวนการสกัดน้ำมันลินสีด เริ่มจากการตากแห้งเมล็ดลินสีดแล้วเก็บไว้ จากนั้นล้างสิ่งสกปรกแล้วผ่านเข้าไปในเครื่องบดแบบลูกกลิ้ง (Roller mill) เพื่อกะเทาะเปลือกออก เมล็ดที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกถูกเคลื่อนไปผ่านไอน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปบีบในเครื่องบีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า เอกซ์เพลเลอร์ (Expellers) จะได้น้ำมันออกมาประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกากนำไปให้ความร้อน แล้วบีบน้ำมันออกที่ความดันสูง ๆ หรือสกัดด้วยตัวทำละลายต่อได้ สำหรับกากที่เหลือมีน้ำมันเหลืออยู่ ประมาณ 1-6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำมันที่ได้จากการสกัดมีความขุ่น ไม้ใส เนื่องจากมีเมล็ดปนอยู่ ดังนั้น จึงควรทำการกรองสิ่งปนเปื้อนก่อนนำไปใช้งาน

น้ำมันลินสีดมีส่วนประกอบของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ซึ่งปริมาณขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ และฤดูกาลในการเจริญเติบโต น้ำมันที่ได้มีลักษณะใสจนถึงมีสีเหลืองอ่อน มีจุดเดือดประมาณ 343 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวที่ -24 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำมันลินสีดเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว ชนิดกรดแอลฟาโอเลอิก ในปริมาณมาก ทำให้เกิดการเหม็นหืน (Rancidity) ได้ง่าย และมีอายุการเก็บรักษาสั้น (Short Shelf-Life) ทั้งการผลิตในเชิงการค้ามีน้อยเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ น้ำมันลินสีดจึงถูกใช้เพื่อการบริโภคน้อย โดยทั่วไป น้ำมันลินสีดดิบถ้าทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจะแข็งภายใน 4 วัน ถ้าสภาวะต่าง ๆ ไม่เหมาะสม อาจถึง 10 วัน ถ้าจะให้แข็งเร็วขึ้นต้องเติมสารเร่งแข็ง สมบัติบางประการของน้ำมันลินสีดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของน้ำมันลินสีด

สมบัติทางเคมี และทางกายภาพ	น้ำมันลินสีดดิบ	น้ำมันลินสีดที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์
ค่าไอโอดีน (g/น้ำมัน 100 g)	170	170
ค่าของกรด (mg KOH /น้ำมัน 1 g)	3.5	0.5
ค่าสะพอนิฟิเคชัน (mg ค่าง/น้ำมัน 1 g)	18	190
ร้อยละของสารที่สะพอนิฟายไม่ได้	1.25	1.25
ความถ่วงจำเพาะ, 25 องศาเซลเซียส	0.9201	0.9184
ดัชนีหักเห, 25 องศาเซลเซียส	1.4780	1.4784

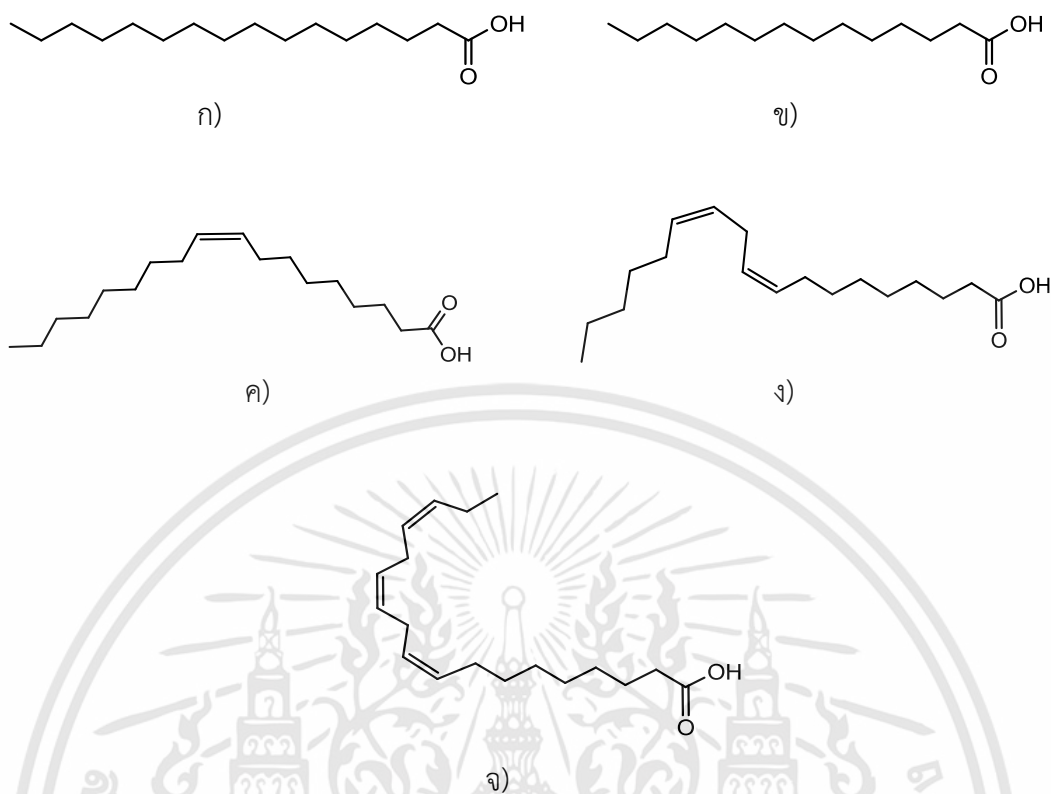
ตารางที่ 2.2 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันลินสีด

ชนิดกรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
กรดปาล์มมิติก	6.72
กรดไมริสติก	2.73
กรดโอเลอิก	21.63
กรดลิโนเลอิก	13.29
กรดลิโนเลนิก	56.61

จากตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันลินสีด โดยมี

โครงสร้างทางเคมีแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันลินสีด (ก) กรดปาล์มมิติก, (ข) กรดไมริสติก, (ค) กรดโอเลอิก, (ง) กรดลิโนเลอิก และ (จ) กรดลิโนเลนิก

2.3.2 น้ำมันทัง (Tung oil)

น้ำมันทังสกัดได้จากต้นทัง ซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Vernicia montana Lour.* อยู่ในวงศ์ *Eupobiaceae* เป็นพืชที่มีในประเทศจีน น้ำมันทังจัดเป็นน้ำมันแห้งเร็วเช่นเดียวกับน้ำมันลินสีด มีสีเหลือง และมีกลิ่นเฉพาะตัว นิยมใช้เป็นส่วนประกอบในการทำสี หรือในหมึกดำ (Indian ink) และยังใช้สำหรับทาไม้ให้มีความมันวาว (Lustrous finish on wood)

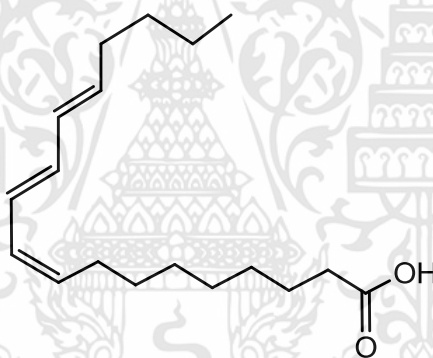
น้ำมันทังมีสมบัติแห้งเร็ว และเหนียว นอกจากนี้ยังมีสมบัติพิเศษ คือ สามารถเกิดการพอลิเมอไรเซชันได้โดยตรงจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดอีน (Diene synthesis) เนื่องจากกรด α -Eleostearic ที่มีอยู่ในปริมาณสูง จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีซึ่งเป็นผลจากระบบคอนจูเกตในสายโซ่ น้ำมันทังมีการเชื่อมโยงที่เร็วกว่าน้ำมันลินสีด และมีความแข็งแรงมากกว่า เมื่อให้ความร้อนแก่ น้ำมันทังที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเป็นเจล (Gelation) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ น้ำมันจะเปลี่ยนเป็นสีดำ หรือหากอุณหภูมิสูงมาก ๆ อาจเกิดการติดไฟขึ้นได้ โดยทั่วไป น้ำมันทังดิบมีสมบัติดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของน้ำมันทั้ง

สมบัติ	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ 20 °C	0.9375
ความชื้น และสิ่งเจือปน (%)	0.01
จุดวาบไฟ (Flash point) (°C)	288.90
อุณหภูมิติดไฟโดยอัตโนมัติ (Autoignition temperature) (°C)	457

2.3.2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันทั้ง

น้ำมันทั้งมีโครงสร้างเป็นไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นโครงสร้างเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมันหลายชนิด โดยชนิดกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้ง แสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งกรดแอลฟาอีลีโอสเตียริก (α -Eleostearic) (รูปที่ 2.10) เป็นกรดไขมันที่มีมากที่สุดถึง 82.0 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกรดแอลฟาอีลีโอสเตียริก

ตารางที่ 2.4 ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้ง

กรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
กรดแอลฟาอีลีโอสเตียริก	82.0
กรดลิโนเลอิก	8.5
กรดปาล์มมิติก	5.5
กรดโอเลอิก	4.0

2.3.3 น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (Epoxydized soybean oil, ESO)

น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) เป็นหนึ่งในน้ำมันธรรมชาติที่มีราคาไม่แพง และหาได้ง่าย นอกจากใช้สำหรับปรุงอาหารแล้วยังใช้น้ำมันถั่วเหลืองในอุตสาหกรรมอื่นอีก เช่น ในอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวมีการใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นตัวทำละลายในหมึกพิมพ์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันถั่วเหลืองจัดอยู่ในประเภทน้ำมันแห้งช้า ซึ่งเป็นน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ชนิดหนึ่งประกอบไปด้วยกรดไขมันทั้งชนิดอิ่มตัว และชนิดไม่อิ่มตัวหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันถั่วเหลือง

กรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
กรดปาล์มมิติก	11
กรดโอเลอิก	26
กรดลิโนเลอิก	52
กรดลิโนเลนิก	7
กรดสเตียริก	4

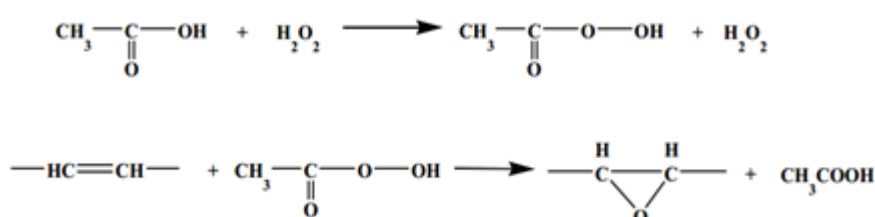
2.3.3.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์

น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ (ESO) คือ น้ำมันถั่วเหลืองที่ถูกดัดแปร โดยผ่านกระบวนการอีพ็อกซิเดชันที่ตำแหน่งพันธะคู่ เกิดเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาน้ำมันถั่วเหลืองกับกรดแอซติกเปอร์ออกไซด์โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.12

น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ถ้ามีการเชื่อมโยงโครงสร้างเป็นตาข่ายสามมิติ แต่ยังมีข้อด้อยด้านความแข็งแรง อาจปรับปรุงสมบัติโดยการผสมกับอีพ็อกซีเรซิน หรือการทำโคพอลิเมอร์เซชันกับสไตรีน และการทำเป็นวัสดุคอมโพสิทก์สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทานต่อการใช้งานมากขึ้น



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันบนพันธะคู่ของน้ำมันถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์

- ลักษณะเป็นของเหลวเหนียว สีเหลืองอ่อน
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.993
- มีค่าจุดเยือกแข็ง 0 องศาเซลเซียส
- จุดวาบไฟ 315 องศาเซลเซียส

2.3.3.2 การประยุกต์ใช้งาน

น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ถูกใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่ใส่ลงในกระบวนการผลิตพลาสติก เพื่อให้มีสมบัติเปลี่ยนไป คือ มีความอ่อนนุ่ม, ยืดหยุ่นสูง, ทนต่อสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และทนต่ออุณหภูมิ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตเป็นหมึกพิมพ์ถั่วเหลืองได้

หมึกพิมพ์น้ำมันถั่วเหลือง (Soy ink)

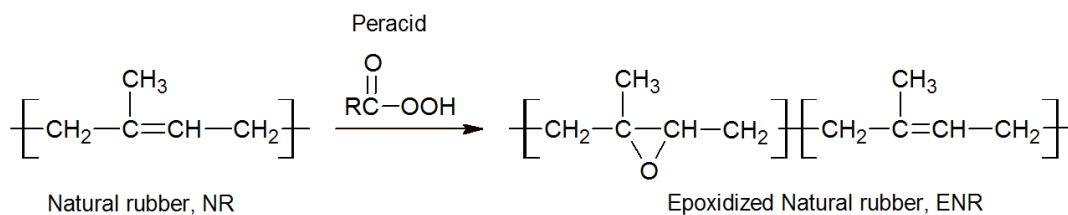
หมึกพิมพ์น้ำมันถั่วเหลืองมีลักษณะคล้ายกับหมึกพิมพ์ที่มีขายทั่วไป แต่แตกต่างกันที่ส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิตหมึกพิมพ์ โดยนำน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งเป็นน้ำมันที่สกัดจากธรรมชาติ และไม่มีสารพิษมาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันที่สกัดจากธรรมชาติ และไม่มีสารพิษ น้ำมันถั่วเหลืองที่อยู่ในหมึกพิมพ์ช่วยให้สารสีทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยหมึกพิมพ์นี้มีการใช้สารระเหยในปริมาณน้อย จึงช่วยลดมลพิษทางอากาศ และลดการสัมผัสสารพิษของผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังช่วยให้การนำกระดาษกลับมาใช้ใหม่ทำได้ง่ายขึ้นในกระบวนการแยกหมึกออกจากสิ่งพิมพ์

หมึกพิมพ์ถั่วเหลืองนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากอัตราส่วนผสมของสารให้สี รวมถึงสารเติมแต่งอื่น ๆ ยังคงมีปริมาณใกล้เคียงกับอัตราส่วนในหมึกฐานน้ำมันปิโตรเลียม แต่หมึกพิมพ์ฐานน้ำมันถั่วเหลืองมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า

2.4 ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR) [26]

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ เป็นยางที่นำยางธรรมชาติมาปรับโครงสร้างโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) เป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เกิดเป็นวงแหวนอีพ็อกไซด์ที่บริเวณพันธะคู่ ผ่านกระบวนการอีพ็อกซิเดชัน (Epoxidation) ในโครงสร้างแบบสุ่ม ยางประเภทนี้มีลักษณะเป็นยางสีน้ำตาลเข้มกว่ายางธรรมชาติปกติ ระดับของการเกิดอีพ็อกซิเดชันตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์ เช่น ENR10, ENR25 และ ENR50 คือ ยางธรรมชาติที่มีหมู่อีพ็อกไซด์ร้อยละ 10, 25 และ 50 โดยโมล ตามลำดับ ตัวอย่างปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตยางธรรมชาติอีพอกไซด์ [27]

2.4.2 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างมีผลทำให้มีสมบัติบางประการที่เปลี่ยนไปจากยางธรรมชาติ เช่น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, ความถ่วงจำเพาะ และความมีขี้ เป็นต้น

- T_g ของ ENR25 และ ENR50 เท่ากับ -45°C และ -20°C ตามลำดับ
- ความถ่วงจำเพาะของ ENR25 และ ENR50 มีค่า 0.970 และ 1.030 ตามลำดับ
- ความมีขี้สูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์
- ความทนน้ำมัน (Oil resistance) เพิ่มขึ้น เมื่อมีหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้น
- การซึมผ่านของแก๊ส (Gas permeability) ต่ำลง เมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์มากขึ้น

2.4.3 การประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นยางที่ถูกปรับปรุงให้มีขี้เพิ่มมากขึ้น สามารถทนต่อน้ำมัน และตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ได้ดีขึ้น ทนต่อโอโซน และมีการซึมผ่านของอากาศต่ำ จึงมีประโยชน์ในการใช้งานประเภทสารยึดติด, รองเท้า, สี, ยางรถยนต์, พื้นยาง, และผลิตพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) กับพอลิเมอร์ที่มีขี้ เช่น PVC

ตารางที่ 2.6 สมบัติเด่น และ การใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์[28]

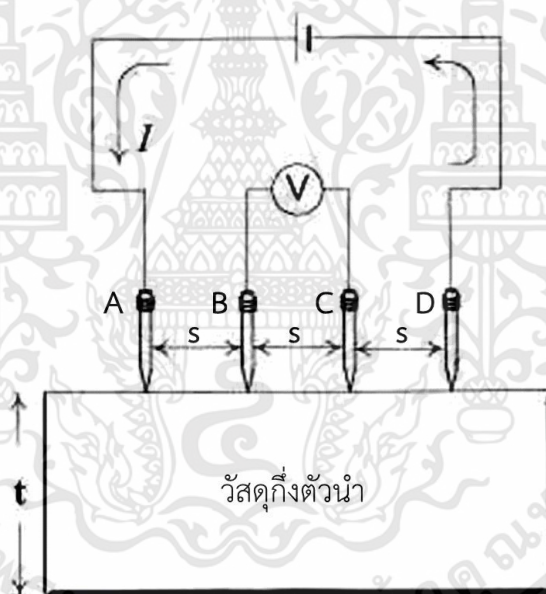
สมบัติเด่น	การใช้งาน	เกรดของยาง
ทนทานต่อน้ำมัน	ท่อ, ข้อต่อ, และสายยาง	ENR25, ENR50
การซึมผ่านของอากาศต่ำ	แบลตเตอร์, ยางใน, เคลือบภายในท่อ	ENR25
เสริมประสิทธิภาพได้ด้วยซิลิกา	ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่ไม่ต้องการให้เป็นสีดำ	ENR25
มีความต้านทานต่อการหมุนต่ำ	ดอกยางรถยนต์, พื้นยาง, พื้นรองเท้ายาง	ENR25, ENR50
การหน่วง	ป้องกันการสั่นของเครื่อง และ ใช้งานกับเครื่องกลทางวิศวกรรม	ENR25, ENR50
การติดประสาน	กาว, เคลือบสายพานพีวีซี	ENR25, ENR50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยวิธีเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe method)

สภาพความต้านทานแสดงถึงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญเมื่อต้องการนำวัสดุกึ่งตัวนำมาสรางเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า โดยการวัดความต้านทานให้มีประสิทธิภาพนั้นต้องทำการควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้คงที่ แต่ในทางปฏิบัติแล้วการวัดความต้านทานให้มีความแม่นยำสูงทำได้ยาก เนื่องจากผลจากสภาพแวดล้อม และสภาวะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ, เครื่องมือวัด และการติดตั้งเครื่องมือวัด

วิธีเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe method) เป็นวิธีมาตรฐานในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) มีหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นการวัดความต้านทานด้วยเข็มขนาดเล็กลง 4 จุด โดยระยะห่างระหว่างเข็มทั้ง 4 มีระยะ s เท่า ๆ กัน ในขั้นตอนการทดสอบหัวเข็มทั้ง 4 สัมผัสบนพื้นผิวของวัสดุ และทำการให้กระแสไฟฟ้า (I) คงที่ที่เข็มด้านนอกสุด (เข็ม A) กระแสไฟฟ้าจะไหลจากเข็ม A ผ่านวัสดุไปยังเข็ม D เกิดเป็นแรงดันตกคร่อม จึงทำการวัดค่าแรงดัน (V) ที่เข็มด้านใน (เข็ม B และ C) [50]



รูปที่ 2.14 การวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด

ความต้านทาน (Resistance : R) ที่ได้จากเข็มคู่ด้านในให้ค่าแตกต่างกัน [51] ดังแสดงในสมการที่ 2.1

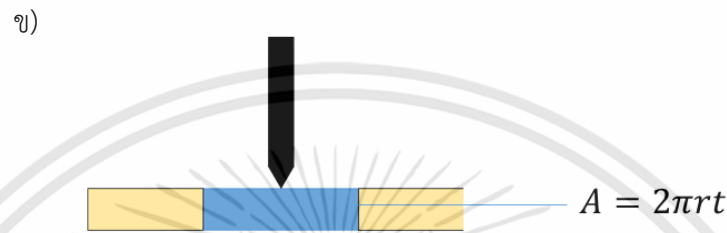
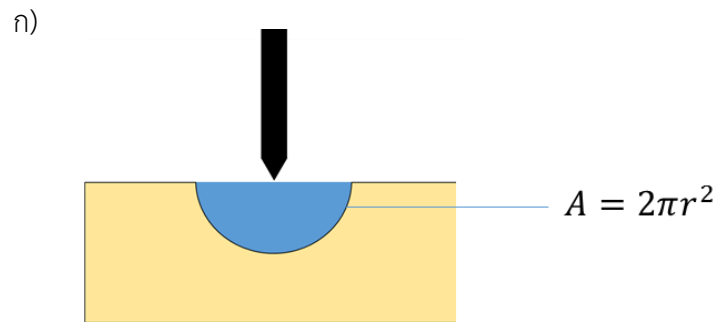
$$\Delta R = \rho \left(\frac{dx}{A} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ แทน สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)

x แทน ระยะของหัวเข็มที่จ่ายกระแสไฟฟ้าถึงหัวเข็มที่ตรวจวัด

A แทน พื้นที่ผิวที่กระแสไฟฟ้าสามารถแทรกไปในชิ้นงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12.5 แบบจำลองภาพตัดขวางของกระแสไฟฟ้าที่แทรกเข้าไปใน ก) ชิ้นงานหนา และ ข) ชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง

กรณีของชิ้นงานหนา (Bulk sample) [51, 52] ความหนาของชิ้นงาน (t) มากกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม (s) มากๆ หรือ $t \gg s$ รูปแบบของกระแสไฟฟ้าแทรกผ่านเข้าไปในชิ้นงานมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม (รูปที่ 12.5 ก)) พื้นที่ผิวที่กระแสไฟฟ้าแทรกเข้าไปในชิ้นงานหนามีค่า $A = 2\pi r^2$ ดังนั้น

$$\Delta R = \rho \left(\frac{dx}{2\pi r^2} \right) \quad (2.2)$$

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi r^2} = \left[\frac{\rho}{2\pi} \left(-\frac{1}{x} \right) \right]_{x_1}^{x_2} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{1}{2s} \frac{\rho}{2\pi} \quad (2.4)$$

เนื่องจากเกิดการทับซ้อนกันของกระแสที่หัวเข็มด้านนอกทั้งสอง $R = V/2I$ ดังนั้น

$$\rho = 2\pi s \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ s แทน ระยะห่างของหัวเข็ม (Probe spacing)

V แทน ค่าต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)

I แทน กระแสไฟฟ้า (Electric current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นแผ่นบาง (Thin sheet) [51, 52] ความหนาของชิ้นงานน้อยกว่าระยะห่างระหว่างเข็มวัดมาก ๆ หรือ $T \ll s$ รูปแบบของการแทรกผ่านชิ้นงานมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (รูปที่ 12.5 ข)) พื้นที่ผิวที่กระแสไฟฟ้าแทรกเข้าไปในชิ้นงานที่เป็นแผ่นบางมีค่า $A = 2\pi xt$ ดังนั้น

$$\Delta R = \rho \left(\frac{dx}{2\pi xt} \right) \quad (2.6)$$

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi xt} \quad (2.7)$$

$$R = \int_s^{2s} \frac{\rho}{2\pi t} \frac{dx}{x} \quad (2.8)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi t} \ln x \Big|_s^{2s} \quad (2.9)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi t} \ln 2 \quad (2.10)$$

หรือ

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.11)$$

ความต้านทานของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง เป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นกับระยะห่างของเข็มวัดสามารถรายงานค่าด้วยค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance : R_s)

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (2.12)$$

ดังนั้น

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.13)$$

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Secor และคณะ [7] ได้พัฒนาการเตรียมหมึกพิมพ์สำหรับการพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แกรฟีน (Graphene) ที่ผ่านกระบวนการลอกชั้นแกรฟีน (Liquid-phase exfoliation) โดยใช้ไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose, NC) เพื่อช่วยในการแยกชั้นแกรฟีน ผ่านกระบวนการจนได้ผง Graphene/NC และเตรียมหมึกพิมพ์ได้โดยนำผง Graphene/NC กระจายในสารละลาย และใช้การโซนิเคชัน (Sonication) ช่วยให้มีการกระจายตัวที่ดี เมื่อนำไปทำการทดสอบ พบว่ามีการนำไฟฟ้าประมาณ 40,000 S/m ซึ่งถือว่ามีค่าสูงสำหรับวัสดุคาร์บอน และฟิล์มหมึกพิมพ์ที่ได้ยังทนต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเชิงกล และสภาพแวดล้อมได้ดี ยืนยันจากการทดสอบการโค้งงอ (Cyclic bending), การทดสอบด้วยสก๊อตเทป (Scotch tape testing), การทดสอบ Damp heat aging

Patil [4] ศึกษาการเตรียมหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้อะคริลิกเรซิน (Acrylic resin) และได้เติมโปรตีนถั่วเหลือง เพื่อลดสัดส่วนการใช้พอลิเมอร์จากปิโตรเลียม พร้อมศึกษาผลของสัดส่วนแกรฟีนต่อแกรไฟต์ พบว่าสูตรหมึกที่มีการใช้แกรฟีนในสัดส่วนที่มากกว่า มีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า และการเติมโปรตีนถั่วเหลืองทำให้มีความต้านทานการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

Hummers และคณะ [29] เตรียมแกรฟีนออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในสภาวะกรด และมีโซเดียมไนเตรตช่วยในการเกิดปฏิกิริยา เกิดเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ และทำการโซนิเคชันเพื่อให้เกิดการลอกของชั้นแกรไฟต์ออกไซด์ เพื่อให้ได้เป็นแกรฟีนออกไซด์

Chen และคณะ [30] สังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ซึ่งพัฒนาจากวิธีของ Hummers โดยไม่ใช้โซเดียมไนเตรตเพื่อลดการเกิดแก๊สที่เป็นพิษจากขั้นตอนการเตรียม พบว่าแกรฟีนออกไซด์ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากวิธีนี้มีการกระจายตัว, โครงสร้างทางเคมี, ความหนา, รูปร่าง และร้อยละผลผลิตใกล้เคียงกับวิธีของ Hummers แบบดั้งเดิม

Liu และคณะ [31] ศึกษาการใช้ลิกนินช่วยในการลอกชั้นแกรไฟต์ออกจากกัน เพื่อให้ได้แกรฟีนที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งเกิดการลอกหลุดออก และมีความเสถียร เนื่องจากลิกนินสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่ผิวของชั้นแกรฟีน และทำให้แต่ละชั้นของแกรฟีนผลึกออกจากกันซึ่งเป็นผลจากประจุลบของลิกนิน การที่แผ่นแกรฟีนคงตัวอยู่ได้โดยไม่กลับมารวมกันทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี

Yossif และคณะ [32] เตรียมพอลิเมอร์จากน้ำมันพืชสำหรับนำไปใช้เป็นหมึกพิมพ์ โดยเตรียมจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ และ น้ำมันละหุ่งอีพ็อกซิไดซ์ ผ่านปฏิกิริยาเปิดวงอีพ็อกซิไดซ์ (Ring opening reaction) ด้วยพอลิอีเทอร์เอมีน (Polyether amine) และพอลิพรอพิลีนไกลคอล (Polypropylene glycol) พบว่า พอลิเมอร์ที่เตรียมได้แสดงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงที่ดี และหมึกที่ได้มีเสถียรภาพสูง โดยพอลิเมอร์ที่มีสมบัติดีที่สุดคือ น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ และน้ำมันละหุ่งอีพ็อกซิไดซ์ ที่ถูกเปิดวงด้วย พอลิอีเทอร์เอมีน

Pawar และคณะ [33] เตรียมอีพ็อกซีเรซินจากธรรมชาติ โดยเตรียมจากน้ำมันฝ้ายอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidized cottonseed oil, ECO) และ น้ำมันสาหร่ายอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidized algae oil, EAO) ซึ่ง ECO และ EAO ทำปฏิกิริยากับกรดซิตริก (Citric acid) (ได้เป็น COCA และ AOCA) และกรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) (ได้เป็น COTA และ AOTA) โดยนำของผสมไปให้อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ได้เป็นของเหลวหนืดจึงนำไปหล่อเป็นฟิล์มบางแล้วอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และทำการ post cure ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายเบส และยังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Karmalm และคณะ [34] ศึกษาการเชื่อมโยงน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ในพีวีซีพลาสติกซอล และพีวีซีที่อยู่ในรูปสารแขวนลอย โดยใช้สัดส่วนน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ 50 phr ต่อพีวีซีแต่ละชนิด และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการอบ 5, 10, 15, 20, และ 30 นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้นในสูตรที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ใช้ สรุปได้ว่าน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์มีผลต่อการเชื่อมโยงที่ทำให้วัสดุแข็งตัวได้

พงศยุทธ์ จันทอง และคณะ [35] ศึกษาการเตรียมและพัฒนาหมึกพิมพ์สกรีนฐานน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นตัวทำละลายแทนน้ำมันปิโตรเลียมในการผลิตหมึกพิมพ์ พบว่าหมึกพิมพ์ที่ได้ใช้เวลาในการแห้งตัวมากกว่าหมึกพิมพ์เชิงพาณิชย์ จึงเพิ่มการใช้สารเร่งแห้ง ได้แก่ Cobalt naphthenate และ Manganese naphthenate และนอกจากนี้ยังศึกษาชนิดของวารันิซที่ใช้ พบว่า Alkyd resin (BECKOSOL ES-5003-60) ใช้เวลาแห้งตัวน้อยกว่า Alkyd resin (BECKOSOL ES-6501-70-HV) แต่ยังคงใช้เวลาในการแห้งตัวนานกว่าหมึกพิมพ์เชิงพาณิชย์

Oyman และคณะ [36] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันแห้งเร็วที่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต ได้แก่ น้ำมันลินสีด และระบบคอนจูเกต ได้แก่ น้ำมันทัง โดยมี Co(II)-2-ethylhexanoate (Co-EH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยน้ำมัน 2 ชนิดนี้มีกลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แตกต่างกัน โดยที่น้ำมันลินสีดซึ่งไม่เป็นระบบคอนจูเกต เกิดการแตกออกของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งของอัลไลลิก ไฮโดรเจนอะตอม และสามารถจับกับออกซิเจนนำไปสู่การเกิด Hydroperoxide ซึ่งสามารถสลายกลายเป็นอนุมูลอิสระของ Alkoxy และ Peroxy โดยทำให้เกิด การเชื่อมโยง และผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยที่น้ำมันทังที่มีระบบคอนจูเกตเป็นหลักนั้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเริ่มจากการแตกออกของไฮโดรเจนจาก Monoallylic เมื่อเทียบกับน้ำมันลินสีดแล้วมีการใช้ปริมาณออกซิเจนที่น้อยกว่า ซึ่งทำให้เกิด Hydroperoxide รวมทั้งได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้น้อยมาก แสดงให้เห็นว่าอนุมูลอิสระชอบเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะคู่ที่เป็นระบบคอนจูเกตมากกว่า โดยจะแทนที่ไฮโดรเจนอะตอมของ Monoallylic

ธันย์จิรา บัวนุช และคณะ [37] ศึกษาการเตรียมหมึกพิมพ์เอทชิง (Etching) สำหรับงานพิมพ์ โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ (ESO) และผสมกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ โดยมีการใช้น้ำมันลินสีด และน้ำมันทังช่วยทำให้เกิดเป็นฟิล์มได้โดยเกิดการเชื่อมโยง นอกจากนี้ยังใช้แว็กซ์เพื่อเพิ่มความหนืดให้กับหมึกพิมพ์ และยังทำให้มีการยึดเกาะของเนื้อหมึกพิมพ์ดี พบว่าหมึกพิมพ์สูตร A15W3L1T1CD5(6.5), A15W3L1T1CD8(6.5) และ A15W3TCD8(6.5) มีค่าความเข้มข้นเฉดสี และความหนืดของหมึกพิมพ์เทียบเท่าหมึกพิมพ์เชิงพาณิชย์ และยังมีสมบัติอื่น ๆ ได้แก่ ความสามารถในการถ่ายโอนหมึกพิมพ์ และความคมชัดของลวดลายมีคุณภาพสูง นอกจากนี้ยังไม่มึกลิ่นเหม็น, สามารถชะล้างออกได้ด้วยน้ำยาซักล้างสูตรน้ำ และมีเสถียรภาพของอายุการใช้งานที่นาน แต่ยังคงมีการยึดติดของหมึกพิมพ์ต่ำ และใช้เวลาในการแห้งตัวนานกว่าหมึกพิมพ์เชิงพาณิชย์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าฐานน้ำมัน ที่มีองค์ประกอบของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์เป็นฐานหมึก โดยพัฒนาต่อจากงานวิจัยของ ธันย์จิรา บัวนุช และคณะ [37] ซึ่งใช้น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์เป็นองค์ประกอบหลักของหมึกพิมพ์ และยังมีการใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ เพื่อเพิ่มการยึดติดของหมึกพิมพ์ และลดรอยซึมของน้ำมันที่เกิดขึ้น รวมทั้งใช้น้ำมันลินสีด และน้ำมันถั่ว เพื่อช่วยในการแห้งตัวที่ดีของหมึกพิมพ์ โดยงานวิจัยนี้จะใช้สารตัวเติมที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า ได้แก่ แกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ขึ้นจากการปรับขั้นตอนการเตรียมจากงานวิจัยของ J. Chen และคณะ [30] ทำการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของแกรฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ และศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของหมึกพิมพ์ ได้แก่ การแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์, ลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์, สภาพความต้านทานน้ำของฟิล์มหมึกพิมพ์ และความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1) น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์ (Epoxidized soybean oil, ESO) : เกรดการค้า VIKOFLEX® Series 7170, บริษัท ศรีเทพไทยเคมี จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์

สมบัติ	VIKOFLEX® Series 7170
ความหนาแน่น (g/ cm ³)	0.993
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	1000
ค่าการหักเหของแสง	1.472
ปริมาณอีพอกไซด์ (%)	7.0

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัท

2) ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) : เกรดการค้า Epoxyprene 25 (ENR25), บริษัท Muang Mai Guthrie PCL จำกัด

ตาราง 3.2 สมบัติของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

สมบัติ	ENR25
เปอร์เซ็นต์ Epoxidation	25±2
Ash content (Max. % Weight)	0.50
Mooney viscosity ML (1' + 4') 100 C (Range Min-Max)	70-100

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัท

- 3) น้ำมันลินสีด (Linseed oil) : บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
- 4) น้ำมันทัง (Tung oil) : บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
- 5) แกรไฟต์ (Graphite) : บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด
- 6) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H₂SO₄) : บริษัท S D Fine-Chem จำกัด
- 7) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO₄) : บริษัท Ajax Finechem จำกัด
- 8) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) : บริษัท CARLO EABA reagents
- 9) น้ำกลั่น
- 10) ทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง (High speed agitator) พร้อมใบพัดกวน : รุ่น RW 20 Digital, IKA Co., Ltd.
- 2) แผ่นกวนให้ความร้อน (Hot plate with stirrer) : รุ่น C-MAC HS 7, IKA Co., Ltd.
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด : รุ่น AX224, บริษัท Sartorius จำกัด
- 4) เครื่องโซนิเคเตอร์ : รุ่น Elmasonic S 30 H, Elma Schmidbauer
- 5) เครื่องกรองสุญญากาศ
- 6) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) : รุ่น UNIVERSAL 320, Hettich
- 7) เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) : รุ่น CoolSafe 110, scientific promotion Co., Ltd.
- 8) หลอดเซลโลเฟน (Dialysis tubing) : MWCO 8000-14000
- 9) เครื่องแก้ว
- 10) ถ้วยโลหะ
- 11) ซ้อนตักสาร
- 12) เกรียงปาดสี
- 13) แม่เหล็กคนสาร
- 14) กระจกกรอง
- 15) อ่างน้ำแข็ง
- 16) แผ่นพลาสติกใส
- 17) กระจกการ์ดโปร
- 18) ถ่านไฟฉาย 9V, Panasonic
- 19) สายไฟพร้อมปากคีบ
- 20) หลอดไฟ LED ขนาดเล็ก
- 21) ตู้รังสีอัลตราไวโอเล็ต
- 22) Fourier transform infrared spectrometer รุ่น IRTracer-100, SHIMADZU
- 23) X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance, Bruker BioSpin AG
- 24) Digital microscope รุ่น Dino-lite Pro 2, ANMO Electronics Corporation
- 25) เข็มวัด Four-point probe รุ่น HMS-3000, ECOPIA
- 26) เครื่องวัดมุมสัมผัส Contact Angle System OCA, Dataphysics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO)

- 1) เตรียมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 70 มิลลิลิตร เติมน้ำกรดไฟต์ 3.0 กรัม ลงไป และปั่นกวนในอ่างน้ำแข็งจนกรดไฟต์กระจายตัวอยู่ในกรดซัลฟิวริก
- 2) ค่อย ๆ เติม KMnO_4 9.0 กรัม โดยขั้นตอนนี้ต้องควบคุมให้สารมีอุณหภูมิต่ำกว่า 20°C
- 3) ปรับอุณหภูมิของสารโดยเปลี่ยนจากอ่างน้ำแข็งเป็นอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C และปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
- 4) เติมน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร และปั่นกวนที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 15 นาที
- 5) เติมน้ำปราศจากไอออน 500 มิลลิลิตร และค่อย ๆ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30%) 15 มิลลิลิตร
- 6) กรองสารผสม และล้างด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นำของแข็งที่ได้จากการกรองมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 600 มิลลิลิตร เรียกสารในขั้นตอนนี่ว่า
- 7) นำสารที่ได้จากข้อ 6 ไปทำให้บริสุทธิ์โดยการแยกสารผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Dialysis) เป็นเวลา 1 สัปดาห์
- 8) นำสารที่ได้จากข้อ 7 เจือจางให้มีปริมาตร 1.2 ลิตร ปั่นกวนข้ามคืน และโซนิเคชัน 30 นาที เพื่อให้เกิดการลอก (Exfoliation) ของชั้นแกรไฟต์ออกไซด์ เปลี่ยนเป็นแกรฟีนออกไซด์ (XGO)
- 9) นำสารที่ได้จากข้อ 8 ทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ความเร็วรอบ 4000 rpm เป็นเวลา 20 นาที เพื่อแยกแกรไฟต์ที่ไม่ถูกแยกชั้นออก และนำเฉพาะส่วนที่เป็นชั้นของเหลว (XGO) ไปทำปฏิกิริยารีดักชัน
- 10) XGO ที่ได้จากข้อ 9) นำทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยความร้อนโดยดัดแปลงจากวิธีของ Loryuenyong V. [46] ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ได้เป็นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO)
- 11) ทำสารผสมให้แห้งโดยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)

3.4 การเตรียมสารละลายยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (สารละลาย ENR)

- 1) เตรียมน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์ (Epoxidized soybean oil, ESO) 80 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นชั่งยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR) เกรด ENR-25 20 กรัม แล้วใส่ลงใน ESO ที่เตรียมไว้
- 2) ให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งปั่นกวนจนกระทั่งสารทั้งหมดละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ได้สารละลายยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์เข้มข้น 20% w/w ของน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์

3.5 การเตรียมสูตรน้ำมันผสม

- 1) เตรียมองค์ประกอบตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.3
- 2) ทำการผสมสารที่เตรียมได้จากข้อ 1) ด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- 3) เก็บน้ำมันผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของสารละลาย ENR, น้ำมันทั้ง และ น้ำมันลินสีด ในสูตรน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ

ชื่อสูตร	สารละลาย ENR (g)	น้ำมันทั้ง (g)	น้ำมันลินสีด (g)
T1L4	5.0	1.0	4.0
T2L3	5.0	2.0	3.0
T1L1	5.0	2.5	2.5
T3L2	5.0	3.0	2.0
T4L1	5.0	4.0	1.0

กำหนดสัญลักษณ์ ดังนี้
 T แทนน้ำมันทั้ง
 L แทนน้ำมันลินสีด
 ตัวเลข แทนสัดส่วนการใช้ น้ำมันซั้กแห้ง

3.6 การเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์

- 1) เตรียมองค์ประกอบตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.4 (สูตรที่ 1-5)
- 2) ทำการผสมสารละลาย ENR, น้ำมันทั้ง และน้ำมันลินสีด ด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- 3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) ผสมร่วมกับแกรไฟต์ โดยผสมให้ผงแกรไฟต์กระจายอย่างสม่ำเสมอในน้ำมันผสมด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- 4) เก็บหมึกพิมพ์ที่เตรียมได้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อใช้ในการทดสอบ

3.7 การเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์ร่วมกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

- 1) เตรียมองค์ประกอบตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.4 (สูตรที่ 6-8)
 - 2) ทำการผสมสารละลาย ENR, น้ำมันทั้ง และน้ำมันลินสีด ด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบสูง ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) ผสมร่วมกับแกรไฟต์ และ RGO โดยผสมให้ผงแกรไฟต์ และ RGO กระจายอย่างสม่ำเสมอในน้ำมันผสมด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4) หมักพิมพ์ที่เตรียมได้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ ในสูตรหมักพิมพ์นำไฟฟ้า

สูตรที่	ชื่อสูตร	สารละลาย ENR (g)	น้ำมันทั้ง (g)	น้ำมันลินสีด (g)	แกรไฟต์ (g)	RGO (g)
1	T1L1G2	5.0	2.5	2.5	2.0	0
2	T1L1G4	5.0	2.5	2.5	4.0	0
3	T1L1G6	5.0	2.5	2.5	6.0	0
4	T1L1G8	5.0	2.5	2.5	8.0	0
5	T1L1G10	5.0	2.5	2.5	10.0	0
6	T1L1G7.5R0.5	5.0	2.5	2.5	7.5	0.5
7	T1L1G7.0R1.0	5.0	2.5	2.5	7.0	1.0
8	T1L1G6.0R2.0	5.0	2.5	2.5	6.0	2.0

กำหนดสัญลักษณ์ ดังนี้

ให้ GxRy แทนปริมาณคาร์บอนนำไฟฟ้าในหมักพิมพ์
 โดย G แทนแกรไฟต์
 R แทนรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO)
 x แทนสัดส่วนการใช้แกรไฟต์ในหมักพิมพ์
 y แทนสัดส่วนการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในหมักพิมพ์

3.8 วิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

3.8.1 ชิ้นงานสำหรับศึกษาการแห้งผิว

1) ตัดแผ่นใสให้มีช่องว่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 2x2 ตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1 เพื่อใช้เป็นแบบพิมพ์ควบคุมความหนาของหมักพิมพ์บนชิ้นงาน

2) น้ำมันผสมที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.5 นำมาพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใสด้วยเกรียงปาดสี โดยใช้แบบพิมพ์ในข้อ 1) เพื่อนำไปทดสอบในหัวข้อที่ 3.10

3) หมักพิมพ์ที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.6 นำมาพิมพ์ลงบนกระดาษการ์ดโปร โดยใช้วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

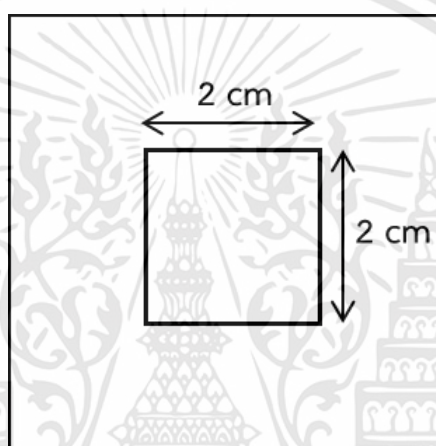
พิมพ์เช่นเดียวกับข้อ 2) เพื่อนำไปทดสอบในหัวข้อที่ 3.11.1

3.8.2 ชิ้นงานสำหรับศึกษาพื้นผิว, สมบัติการนำไฟฟ้า และความต้านทานของหมึกพิมพ์

1) หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.6 และ 3.7 นำมาพิมพ์ลงบนกระดาษการ์ดโปสเตอร์ ด้วยเครื่องปาดสีโดยใช้แบบพิมพ์ที่แสดงตามในรูปที่ 3.1

2) นำชิ้นงานที่พิมพ์หมึกพิมพ์แล้วผ่านการฉายรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้หมึกพิมพ์แห้งตัว

3) ชิ้นงานที่เตรียมได้ นำไปศึกษาพื้นผิว (หัวข้อที่ 3.11.2), สมบัติทางไฟฟ้า (หัวข้อที่ 3.11.3) และความต้านทานน้ำของหมึกนำไฟฟ้า (หัวข้อที่ 3.11.4)



รูปที่ 3.1 แบบพิมพ์แผ่นใสที่มีช่องว่างขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร

3.9 การตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า

3.9.1 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เตรียมสารตัวอย่างของแกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์โดยใช้เทคนิค KBr-pallet มีขั้นตอนดังนี้ ใส่สารตัวอย่างในโถงบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันกับ KBr ในอัตราส่วน sample : KBr เป็น 1:10 แล้วอัดให้เป็นแผ่นบาง ๆ ด้วย Hand press จากนั้นตรวจวัดด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) ในโหมด ATR ตั้งค่าช่วงเลขคลื่น $700-4000\text{ cm}^{-1}$ และจำนวนครั้งในการสแกนเท่ากับ 30

3.9.2 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

นำแกรไฟต์ และแกรไฟต์ที่เป็นผงละเอียดใส่ในช่องใส่สารตัวอย่างของเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้แหล่งกำเนิดเอ็กซ์เรย์ชนิด $\text{Cu K}\alpha$ ในการตรวจวัด โดยใช้ อัตราการกวาดตรวจ (scanning rate) 2 องศาต่อนาที และทำการตรวจวัดในช่วง 5 - 80 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของแกรไฟต์ และรีดิคซ์แกรไฟน์ออกไซด์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบใช้แสง กำลังขยาย 500 เท่า ถ่ายรูป และวัดขนาดอนุภาค

3.10 การทดสอบสมบัติของน้ำมันผสม : การแห้งผิวของน้ำมันผสม

- 1) ชิ้นงานน้ำมันผสมที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.8.1 ข้อ 2) นำไปฉายรังสี UV ที่เวลา 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที
- 2) ชิ้นงานหลังผ่านการฉายรังสี UV ที่เวลาต่าง ๆ นำไปทดสอบการแห้งผิวด้วยวิธีการทดสอบซึ่งปรับจาก มอก. 285 เล่ม 9-2560 โดยทำการเททรายให้ทั่วทั้งชิ้นงานน้ำมันผสม เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที เหยียงชิ้นงาน และใช้แปรงขัดทรายออก (ทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบต้องทำการอบเป็นเวลา 1 วัน และร้อนผ่านตะแกรงเพื่อแยกให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกันก่อนนำมาทำการทดสอบการแห้งผิว)
- 3) สังเกตทรายที่ติดบนชิ้นงาน และบันทึกผล เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแห้งผิวของชิ้นงาน

3.11 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.11.1 การแห้งผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์

- 1) ชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.8.1 ข้อ 3) นำไปฉายรังสี UV ที่เวลา 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที
- 2) ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ผ่านการฉายรังสี UV นำไปทดสอบการแห้งผิวด้วยวิธีเดียวกันกับชิ้นงานน้ำมันผสม (หัวข้อที่ 3.10 ข้อ 2) และ 3))

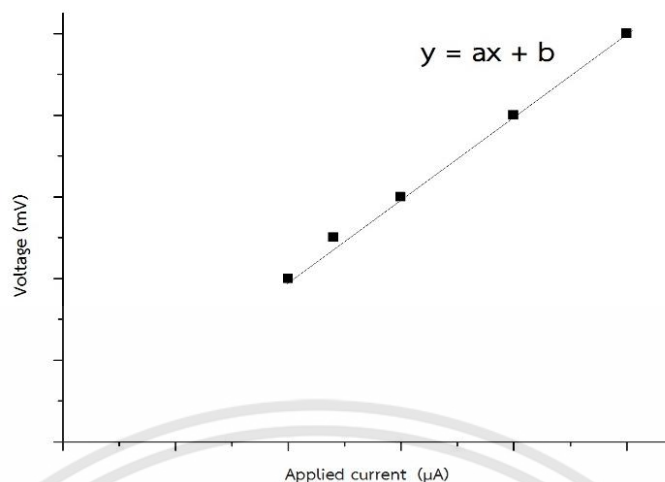
3.11.2 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าภายหลังการฉายรังสี UV

ชิ้นงานที่แห้งแล้วหลังผ่านการฉายรังสี UV นำไปศึกษาพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบใช้แสงที่กำลังขยาย 60 เท่า และ 500 เท่า ทำการบันทึกภาพ

3.11.3 สมบัติทางไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

- 1) ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่แห้งแล้วหลังผ่านการฉายรังสี UV นำมาทดสอบด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (4-point probe method) ด้วย Four-point probe รุ่น HMS-3000
- 2) ตรวจสอบวัดค่าความต่างศักย์ (Voltage : V) ที่ได้เมื่อให้กระแสไฟฟ้า (Electric current (I) 10, 12, 15, 20 และ 25 μ A โดยทำการศึกษาชิ้นงาน 3 ชิ้น ชิ้นละ 3 ตำแหน่ง และหาค่าเฉลี่ยของค่าความต่างศักย์
- 3) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน (I) กับค่าความต่างศักย์เฉลี่ย (V) (รูปที่ 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน (I) กับความต่างศักย์ (V)

4) หาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistance : R) จากความชัน (a) ของสมการเส้นตรง $y = ax + b$ ที่ได้จากกราฟ

5) นำสภาพต้านทานไฟฟ้าไปคำนวณค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance : R_s) ตามสมการที่ 2.13

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \quad (2.13)$$

โดยที่ $R = \frac{V}{I}$

6) เปรียบเทียบค่า R_s ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสูตร

3.11.4 ความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ศึกษาความชอบน้ำจากค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของน้ำบนชิ้นงานหมึกพิมพ์ ทดสอบโดยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส หยดน้ำ 10 μl บนชิ้นงาน และถ่ายภาพหยดน้ำ พร้อมวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ที่เวลา 0, 3, 5 และ 10 นาที

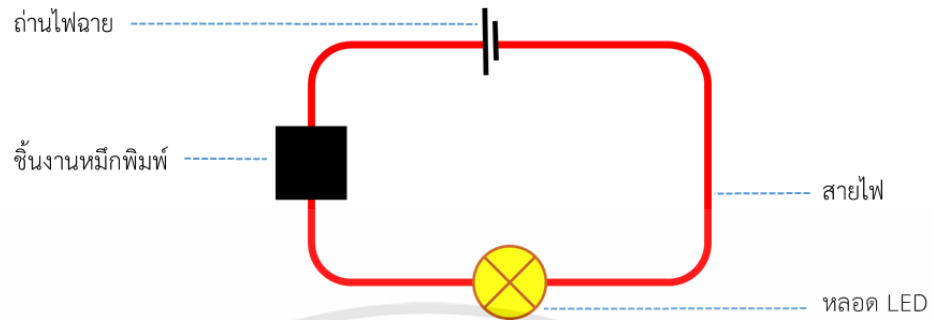
3.11.5 การจำลองการประกอบวงจรโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร

จำลองการใช้งานโดยทำการประกอบวงจรโดยให้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของวงจร โดยรูปแบบการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3.3 และมีส่วนประกอบของวงจร ดังนี้

1. ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$
2. สายไฟ
3. ถ่ายไฟฉาย 9V
4. หลอดไฟ LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของหลอดไฟ LED เมื่อต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ครบวงจร



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการต่อวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

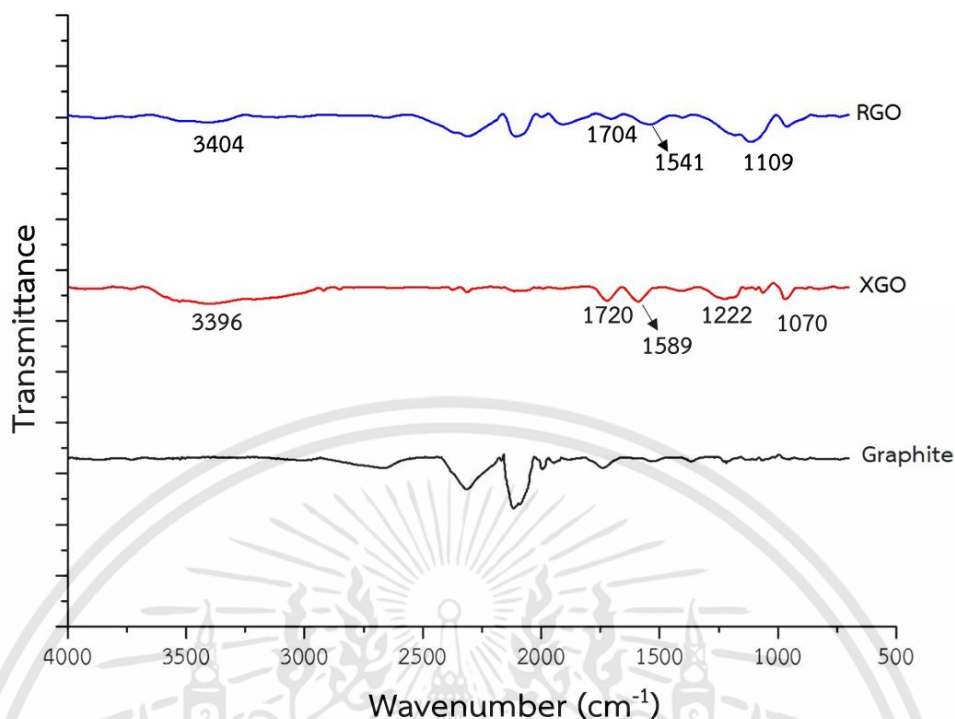
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซีไดซ์ (ESO), ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENR), น้ำมันทัง, น้ำมันลินสีด และคาร์บอนนำไฟฟ้า โดยเริ่มต้นศึกษาสูตรน้ำมันผสมที่ยังไม่ผสมคาร์บอนนำไฟฟ้า โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย ENR : น้ำมันชักแห้ง เป็น 1:1 และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำมันลินสีด : น้ำมันทังเป็น 1:4, 2:3, 1:1, 3:2 และ 4:1 โดยน้ำหนัก แล้วทำการเชื่อมโยงโดยการฉายรังสี UV เพื่อศึกษาระยะเวลาในการแห้งตัวของน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ และ เลือกสูตรน้ำมันผสมจากระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเชื่อมโยงให้เกิดการแห้งตัวเป็นแผ่นฟิล์ม เพื่อนำมาเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยมีแกรไฟต์ และ ริตวิชแกรฟีนออกไซด์ เป็นอนุภาคนำไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ ในอัตราส่วน น้ำมันผสม : แกรไฟต์เป็น 5:1, 5:2, 5:3, 5:4 และ 5:5 โดยน้ำหนัก สูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ถูกนำมาพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใส และกระดาษคาร์ตโปร และฉายรังสี UV ก่อนนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความต้านทานน้ำ, สมบัติทางไฟฟ้า และ จำลองการต่อวงจรโดยใช้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร

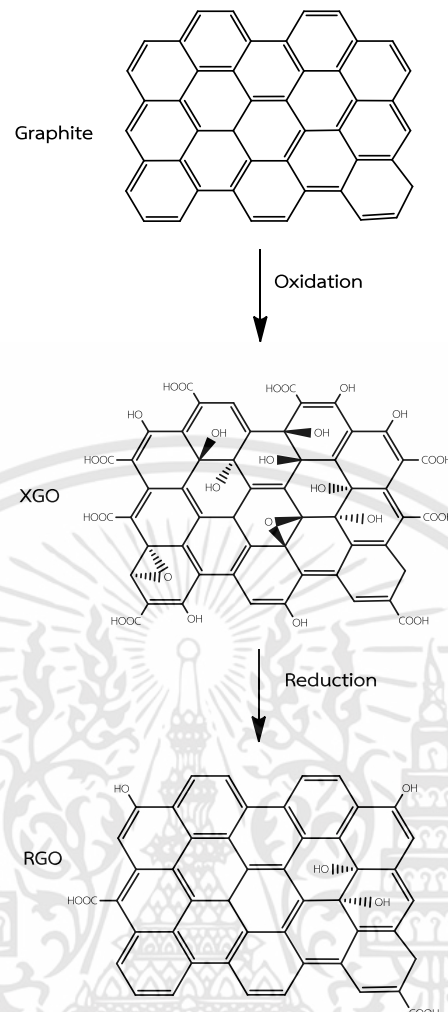
4.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า

จากการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ (XGO) จากผงแกรไฟต์ โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มธาตุออกซิเจนในโครงสร้าง ได้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ผลแสดงดังในรูปที่ 4.1 พบว่า FTIR สเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ (XGO) แสดงพีคที่ตำแหน่ง 3396 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ O-H stretching และที่ตำแหน่ง 1720 และ 1070 cm^{-1} เป็นพีคของ C=O และ C-O ตามลำดับ สัญญาณที่ 1589 cm^{-1} แสดงพีคของ C=C [46] พีคของตำแหน่งพันธะ C-O-C ของวงอีพ็อกไซด์ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 1222 cm^{-1} [30, 39, 46, 47] และเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันเพื่อทำให้เกิดเป็นริตวิชแกรฟีนออกไซด์ (RGO) พบว่า พีคที่ตำแหน่ง 3404 , 1704 และ 1109 cm^{-1} แสดงสัญญาณของพันธะ O-H, C=O, และ C-O ตามลำดับ มีความเข้มของพีคที่ลดลงเมื่อเทียบกับ FTIR สเปกตรัมของ XGO [39, 46] ซึ่งแสดงถึงปริมาณออกซิเจนที่ลดลงเมื่อ XGO ถูกทำปฏิกิริยารีดักชัน และเปลี่ยนรูปเป็นริตวิชแกรฟีนออกไซด์แบบจำลองการสังเคราะห์ XGO และ RGO แสดงในรูปที่ 4.2

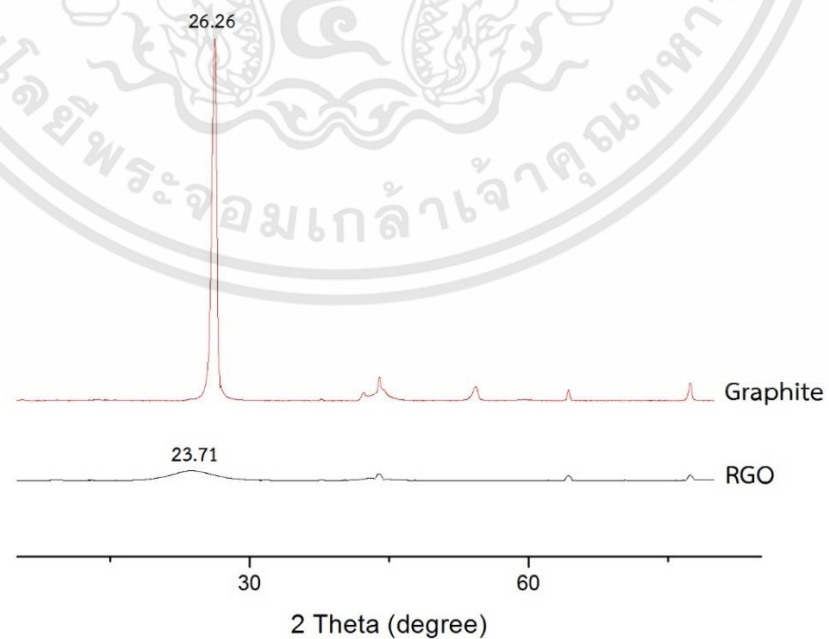


รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของแกรไฟต์, แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์เปรียบเทียบกับ RGO ที่ได้จากการสังเคราะห์จากผงแกรไฟต์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยพีคหลักของแกรไฟต์ปรากฏที่ค่า 2θ เท่ากับ 26.26 องศา มีลักษณะพีคแหลม และมีความเข้มของพีคสูง ซึ่งแสดงถึงระนาบ (002) [42, 46] ของแกรไฟต์ ซึ่งจากการทดสอบด้วย X-ray diffractometer ทำให้ทราบระยะห่างระหว่างชั้นอนุภาค (d-spacing) ของแกรไฟต์มีค่าเท่ากับ 3.39 \AA [46] ส่วนผลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ RGO พบว่าพีคหลักเลื่อนไปที่ตำแหน่ง 23.71 องศา ซึ่งระบุถึงระนาบ (002) [32] มีลักษณะเป็น broad peak และมีค่า d-spacing 3.75 \AA และมีความเข้มพีคที่ลดลงอย่างมาก เนื่องจาก โครงสร้างของแผ่น RGO เกิดการแยกชั้นจากแกรไฟต์จากการทำปฏิกิริยาทางเคมี และความร้อน ทำให้ความเป็นผลึกของ RGO ลดลงเมื่อเทียบกับแกรไฟต์ [40, 46] ส่วนแกรฟีนออกไซด์ก่อนนำไปรีดิวซ์ (XGO) มีลักษณะของอนุภาคที่พองตัว และไม่เรียงตัวเป็นระนาบ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้อาศัยหลักของการหักเหของรังสีเอ็กซ์เมื่อไปกระทบกับผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งหากนำตัวอย่างที่มีลักษณะของพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอมาทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์อาจเกิดความคลาดเคลื่อน หรือได้รูปแบบความเป็นผลึกที่ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง



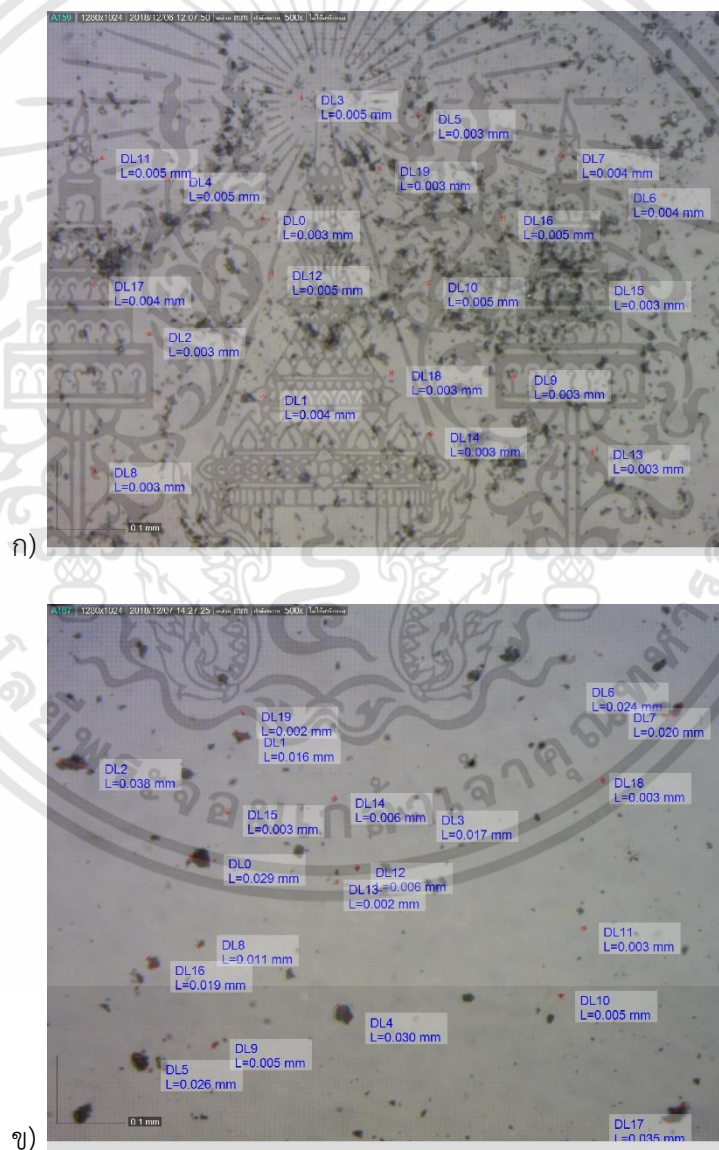
รูปที่ 4.2 แบบจำลองการสังเคราะห์ XGO และ RGO



รูปที่ 4.3 XRD pattern แกรไฟต์ และ RGO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของอนุภาคแกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล กำลังขยาย 500 เท่า โดยตัวอย่างของรูปถ่ายอนุภาคแกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ที่แสดงดัง รูปที่ 4.4 พบว่า แกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3-5 และ 2-38 μm ตามลำดับ ขนาดของรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ที่เตรียมได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคแกรไฟต์ตั้งต้น เนื่องจากอนุภาครีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันที่เหลืออยู่บนโครงสร้างหลังผ่านกระบวนการทางเคมี และยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง โดยการที่อนุภาคมีขนาดเล็กแสดงถึงพื้นที่ผิวของอนุภาคที่มากขึ้น นอกจากนี้ความมีข้อั้วส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค จึงเกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคบางส่วนของรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ทำให้ได้มีลักษณะเป็นแผ่น และมีการกระจายของขนาดทั้งขนาดที่ใกล้เคียง และขนาดที่ใหญ่กว่าแกรไฟต์ตั้งต้น



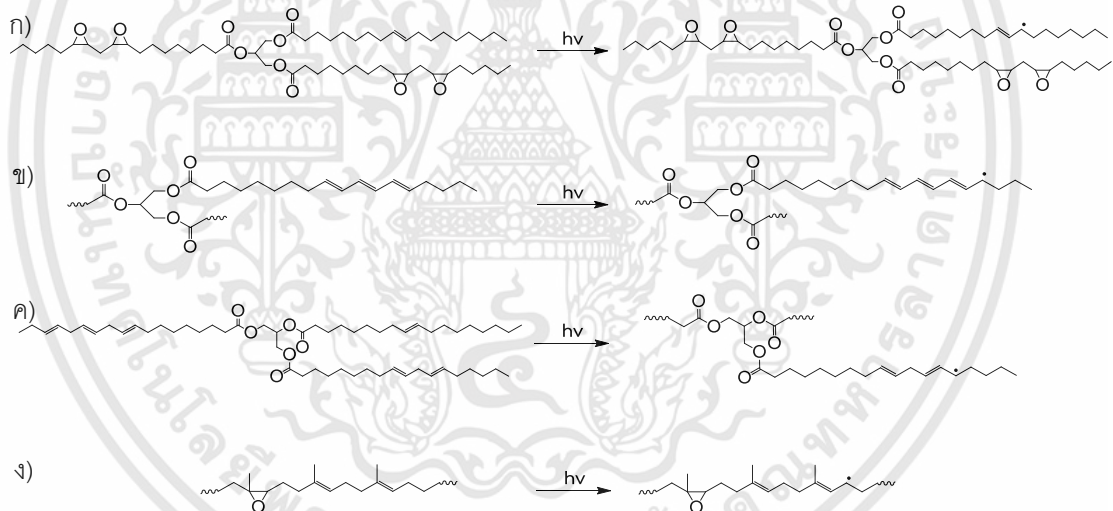
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาค ก) แกรไฟต์ และ ข) รีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

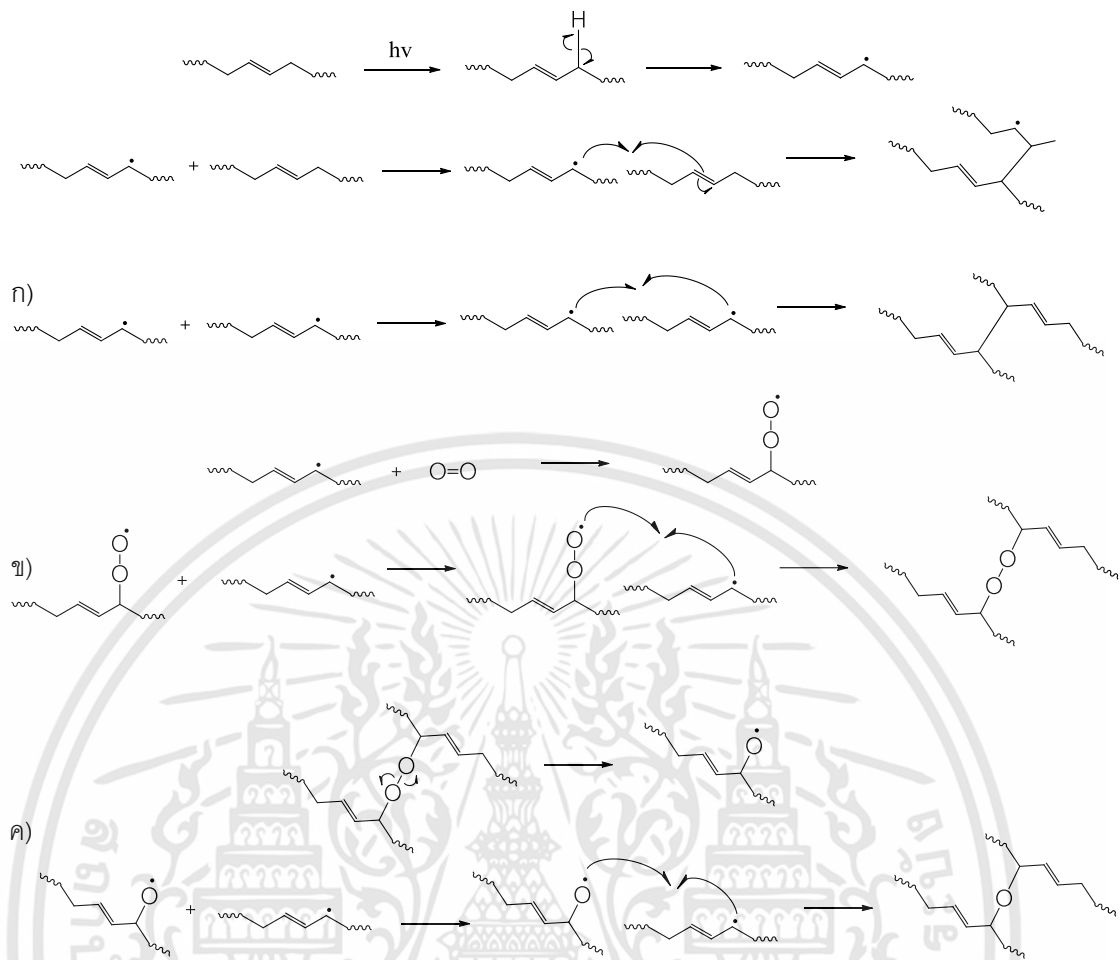
4.2 ผลของน้ำมันชักแห้งต่อการแห้งของสูตรน้ำมันผสม

ในสูตรน้ำมันผสมมีการใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENR) เพื่อช่วยเพิ่มความหนืดให้กับหมึกพิมพ์ และเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดของอนุภาคคาร์บอน โดยความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของ ENR ในตัวทำละลาย ESO เป็นความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถเตรียมได้ การเตรียมสูตรน้ำมันผสมทำโดยนำสารละลาย ENR มาผสมร่วมกับน้ำมันชักแห้ง ได้แก่ น้ำมันทัง และ น้ำมันลินสีด และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำมันทัง และน้ำมันลินสีด ดังแสดงในตารางที่ 3.3 เพื่อศึกษาระยะเวลาในการแห้งที่ผิวของสูตรน้ำมันผสมแต่ละสูตรเมื่อได้รับการฉายรังสี UV และเลือกสูตรที่ใช้เวลาในการแห้งที่เหมาะสมไปใช้ในการเตรียมหมึกต่อไป

กระบวนการแห้งตัวของน้ำมันเกิดจากการที่รังสี UV สามารถกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่งอัลไลลิก [36] และ พันธะคู่ที่อยู่บนโครงสร้างของ ESO, ENR, น้ำมันทัง และ น้ำมันลินสีด เกิดการสลายพันธะเป็นอนุมูลอิสระ และเกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างของส่วนผสมในน้ำมันผสม โดยแบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 แบบจำลองการเกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่ง allylic บนโครงสร้างของโครงสร้าง ก) ESO, ข) น้ำมันทัง, ค) น้ำมันลินสีด และ ง) ENR



รูปที่ 4.6 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงแบบอนุมูลอิสระ ระหว่าง ESO, ENR, น้ำมันทั้ง และ น้ำมันลินสีด เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง ก) -C-C-, ข) -C-O-O-C- และ ค) -C-O-C-

สูตรน้ำมันผสมที่เตรียมได้ นำไปพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใส และฉายรังสี UV ที่ช่วงเวลา 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที ทำการทดสอบโดยใช้ทรายโรยบนชิ้นงาน และใช้แปรงปิดตามหัวข้อที่ 3.10 เพื่อศึกษาเวลาในการแห้งที่ผิวของน้ำมันผสมโดยตรวจสอบทรายที่ติดบนผิวชิ้นงาน โดยกำหนดระดับการแห้งที่ผิวออกเป็น 4 ระดับ ดังนี้

- ระดับ 0 ชิ้นงานมีการแห้งที่ผิวอย่างสมบูรณ์ ไม่มีทรายติดที่พื้นผิว
- ระดับ 1 ชิ้นงานเริ่มมีการแห้งที่ผิว มีทรายติดที่ผิวเพียงเล็กน้อย
- ระดับ 2 ชิ้นงานมีทรายติดอยู่จำนวนมาก และทรายมีสีอ่อน
- ระดับ 3 ชิ้นงานไม่แห้ง มีทรายติดอยู่จำนวนมาก และทรายมีสีเข้มจากการเปียกของน้ำมัน

ตัวอย่างการแห้งที่ผิวของชิ้นงานที่ระดับต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.6 โดยผลการทดสอบที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า สูตร T1L1, T3L2 และ T4L1 เริ่มมีการแห้งที่ผิวระดับ 1 ตั้งแต่ช่วงนาทีที่ 10 และมีการแห้งที่ผิวมากขึ้น เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV มากขึ้น ส่วนสูตร T2L3 เริ่มมีการเอกลสารนี้เป็นเอกลสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกลสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แห้งที่ผิวเมื่อฉายรังสี UV 45 นาที และ สูตร T1L4 เป็นสูตรน้ำมันผสมที่ไม่มีการแห้งที่ผิว แม้มีการฉายรังสี UV นานถึง 60 นาที

จากผลการทดสอบ พบว่า สูตรที่ใช้สัดส่วนของน้ำมันทั้งหมด ใช้เวลาในการแห้งที่ผิวโดยการฉายรังสี UV สั้นกว่า เนื่องจาก โครงสร้างกรดไขมันของน้ำมันทั้งหมดมีระบบคอนจูเกต อนุโมลอิสระที่เกิดขึ้นมีความเสถียรมากกว่าในกรณีของน้ำมันลินสีด ซึ่งมีโครงสร้างของกรดไขมันส่วนใหญ่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต จึงทำให้อนุโมลอิสระเกิดขึ้นที่สายโซ่ของน้ำมันทั้งหมดได้มากกว่าในน้ำมันลินสีด ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงได้ดีกว่าน้ำมันลินสีด อย่างไรก็ตาม สูตรน้ำมันผสมที่มีสัดส่วนของน้ำมันทั้งหมดสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้แม้ไม่ได้รับรังสี UV ซึ่งทำให้น้ำมันผสมเกิดการเชื่อมโยงก่อนการนำไปใช้งานได้ ทำให้ส่งผลต่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเมื่อนำไปเตรียมเป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ผลที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ทราบว่า เวลาที่น้อยที่สุดที่น้ำมันผสมสามารถแห้งที่ผิวได้ คือ 10 นาที และ สูตรน้ำมันผสมที่เลือก เพื่อนำไปใช้ในการผสมสูตรหมึก คือ สูตร T1L1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีการใช้น้ำมันทั้งหมดน้อยที่สุดที่สามารถทำให้น้ำมันผสมเริ่มแห้งที่ผิว



รูปที่ 4.7 ระดับการแห้งที่ผิวของน้ำมันผสม

ตารางที่ 4.1 ระดับการแห้งที่ผิวของชิ้นงานน้ำมันผสมเมื่อผ่านการฉาย UV ที่เวลาต่าง ๆ

สูตร เวลา (นาท)	T1L4	T2L3	T1L1	T3L2	T4L1
1	3	3	3	3	3
5	3	2	2	2	2
10	3	2	1	1	1
15	3	2	1	1	1
20	3	1	1	1	0
30	3	1	0	0	0
45	3	1	0	0	0
60	3	1	0	0	0

4.3 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

สูตรน้ำมันผสมที่เลือกนำมาผสมกับคาร์บอนนำไฟฟ้า เพื่อเตรียมเป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า คือ สูตร T1L1 เนื่องจาก เป็นสูตรน้ำมันผสมที่มีการแห้งที่ผิวได้ดีเมื่อได้รับรังสี UV โดยนำน้ำมันผสมสูตร T1L1 มาเติมคาร์บอนนำไฟฟ้าในอัตราส่วนต่าง ๆ และองค์ประกอบของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสูตร แสดงในตารางที่ 3.4

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรพบว่ามีความหนืดที่แตกต่างกัน โดยความหนืดของหมึกพิมพ์เพิ่มขึ้น เมื่อมีสัดส่วนการใช้ปริมาณแกรไฟต์ในหมึกพิมพ์เพิ่มขึ้น โดยหมึกพิมพ์สูตร T1L1G10 มีความหนืดสูงที่สุด มีลักษณะเป็นก้อน และ ไม่สามารถใช้พิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใสได้ แสดงถึงข้อจำกัดของการเติมแกรไฟต์ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็ง ส่วนสูตรอื่น ๆ สามารถพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใสได้ ดังนั้น สูตรหมึกพิมพ์ที่นำมาศึกษาเวลาในการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์ ได้แก่ สูตร T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8

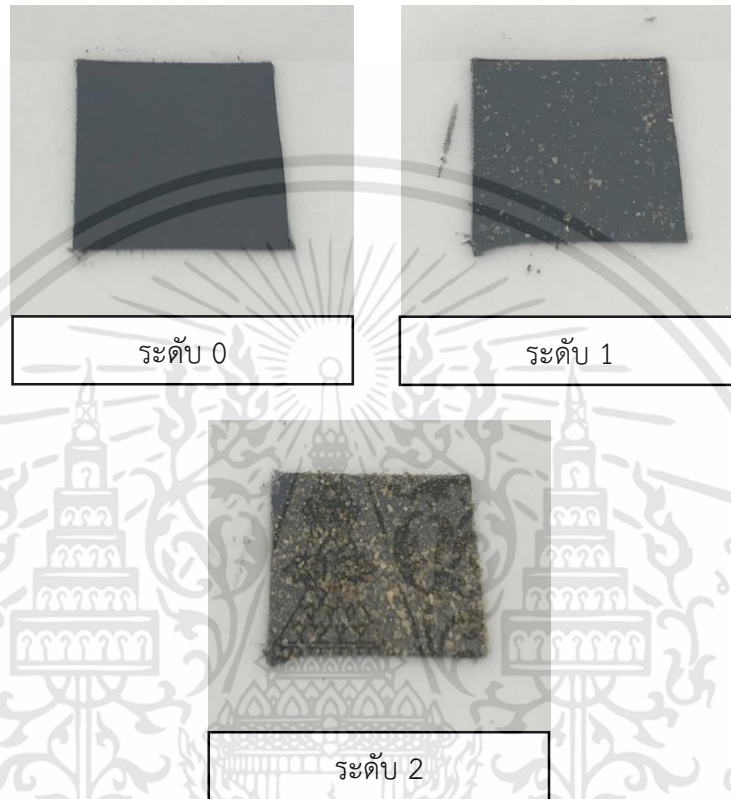
4.3.1 ศึกษาเวลาในการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าถูกทำให้แห้งโดยการฉายรังสี UV เป็นเวลา 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที และนำไปทดสอบตามหัวข้อที่ 3.11.1 เพื่อศึกษาเวลาในการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์โดยตรวจสอบจากทรายที่ติดบนผิวชิ้นงาน โดยกำหนดระดับการแห้งที่ผิว 3 ระดับ ดังนี้

- ระดับ 0 ชิ้นงานมีการแห้งที่ผิวอย่างสมบูรณ์ ไม่มีทรายติดที่พื้นผิว
- ระดับ 1 ชิ้นงานเริ่มมีการแห้งที่ผิว มีทรายติดที่ผิวเพียงเล็กน้อย
- ระดับ 2 ชิ้นงานมีทรายติดอยู่จำนวนมาก

รูปตัวอย่างการแห้งที่ผิวของชิ้นงานที่ระดับต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.7 โดยผลการทดสอบการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า สูตร T1L1G2 สามารถแห้งที่ผิวอย่างสมบูรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ระดับ 0) โดยชิ้นงานไม่มีทรายติดที่พื้นผิว หลังการฉายรังสี UV เป็นเวลา 30 นาที ส่วนสูตร T1L1G4, T1L1G และ T1L1G8 สามารถแห้งที่ผิวอย่างสมบูรณ์เมื่อได้รับรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที โดยพบว่า การเติมอนุภาคแกรไฟต์ช่วยเร่งการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า นอกจากนี้ ปริมาณแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้การแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเกิดเร็วขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.8 ระดับการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2 ระดับการแห้งที่ผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเมื่อผ่านการฉาย UV ที่เวลาต่าง ๆ

สูตร เวลา (นาที)	T1L1G2	T1L1G4	T1L1G6	T1L1G8
1	2	2	2	2
5	2	1	1	1
10	1	0	0	0
15	1	0	0	0
20	1	0	0	0
30	0	0	0	0
45	0	0	0	0
60	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงวนวิชาหกรแข่งงนเพอการศกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใชประยชนดานการค้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์ที่ถูกทำให้แห้ง

ชิ้นงานหมึกพิมพ์ที่ถูกทำให้แห้งโดยการผ่านรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที นำมาศึกษาพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบใช้แสงที่กำลังขยาย 60 เท่า และ 500 เท่า โดยพื้นผิวของชิ้นงานสูตรน้ำมันผสม T1L1 แสดงในรูปที่ 4.9 ก) และ 4.9 ข) ตามลำดับ พบว่า พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยย่นคล้ายรอยแตกจำนวนมาก เช่นเดียวกับกับพื้นผิวของชิ้นงานในสูตร T1L1G2 และ T1L1G4 มีพื้นผิวที่เป็นรอยย่นทั้งที่กำลังขยาย 60 เท่า (รูปที่ 4.9 ข) และ 4.9 ค)) และที่ 500 เท่า (รูปที่ 4.9 ช) และ 4.9 ซ)) สำหรับสูตร T1L1G6 พบว่า มีพื้นผิวที่เรียบจากภาพที่กำลังขยาย 60 เท่า (รูปที่ 4.9 ง)) แต่เมื่อใช้กำลังขยายที่สูงขึ้น (รูปที่ 4.9 ฉ)) พบว่าชิ้นงานยังคงมีลักษณะคล้ายกับสูตรข้างต้น ส่วนสูตร T1L1G8 มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบทั้งที่กำลังขยายต่ำ และ กำลังขยายสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จ) และ 4.9 ฉ) ตามลำดับ

ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าส่วนใหญ่พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยแตก และรอยย่น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของน้ำมันต่าง ๆ ในชิ้นงานสูตรน้ำมันผสม เมื่อชิ้นงานน้ำมันผสม หรือหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าได้รับรังสี UV ซึ่งมีพลังงานสูง เร่งให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นที่โครงสร้างของน้ำมัน แล้วเกิดการเชื่อมโยงผ่านอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น บริเวณด้านบนของหมึกพิมพ์ได้รับรังสี UV ก่อนจึงเกิดการเชื่อมโยงเกิดเป็นชั้นของแข็ง ในขณะที่ชั้นล่างของหมึกพิมพ์ยังมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด จึงทำให้ที่บริเวณผิวด้านบนเกิดการหดตัวในทิศทางที่เป็นอิสระ และเกิดการแยกกันของพื้นผิว เมื่อหมึกพิมพ์แห้งตัวจึงเห็นลักษณะรอยแตก และรอยย่นบนชิ้นงานหมึกพิมพ์ ดังเช่นพื้นผิวของหมึกพิมพ์สูตร T1L1, T1L1G2 และ T1L1G4 ซึ่งเป็นสูตรหมึกพิมพ์ที่มีปริมาณอนุภาคแกรไฟต์น้อย เมื่อเทียบกับสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 เกิดรอยย่นที่พื้นผิวหมึกพิมพ์น้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้แกรไฟต์ในสูตรหมึกพิมพ์ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวหมึกพิมพ์เมื่อแห้งตัว ซึ่งแกรไฟต์เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมันผสม โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กแสดงถึงพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมีมาก ทำให้สามารถช่วยขัดขวางการหดตัวของฟิล์มน้ำมันผสมเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้ ส่งผลให้ช่วยลดการเกิดรอยย่นบนพื้นผิวของฟิล์มหมึกพิมพ์ และมีพื้นผิวที่เรียบได้มากขึ้น เมื่อมีการใช้แกรไฟต์ในปริมาณที่มากขึ้น

จากผลการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์ในหัวข้อที่ 4.3.1 และการศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานในหัวข้อที่ 4.3.2 แสดงให้เห็นว่า หมึกพิมพ์สูตรที่ใช้ปริมาณแกรไฟต์มากสามารถแห้งที่ผิวได้เร็วกว่า โดยเห็นได้จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 สูตร T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8 มีการแห้งผิวที่สมบูรณ์ เมื่อได้รับการฉายรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที ในขณะที่ สูตร T1L1G2 มีการแห้งผิวอย่างสมบูรณ์ เมื่อฉายรังสี UV เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์ โดยพื้นผิวของหมึกพิมพ์มีลักษณะเป็นรอยย่นในสูตร T1L1G2 และ T1L1G4 และฟิล์มหมึกพิมพ์มีพื้นผิวที่เรียบมากขึ้น ในสูตรที่ใช้ปริมาณแกรไฟต์มากขึ้น

สูตร	กำลังขยาย 60 เท่า	กำลังขยาย 500 เท่า
T1L1		
T1L1G2		
T1L1G4		
T1L1G6		
T1L1G8		

รูปที่ 4.9 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกนำไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล ที่กำลังขยาย 60 เท่า ก) – จ) และ ที่กำลังขยาย 500 เท่า ฉ) – ญ) ของสูตร T1L1, T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ปริมาณแกรไฟต์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า

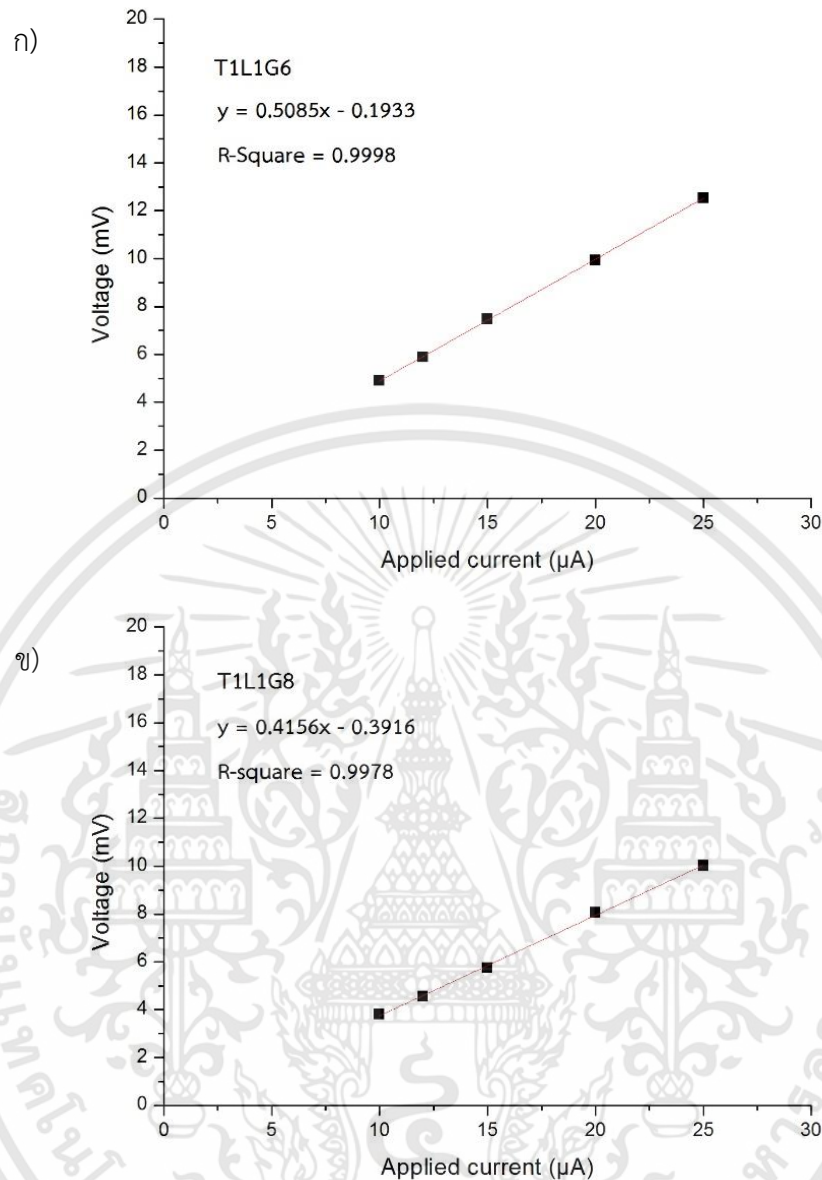
แกรไฟต์เป็นอนุภาคคาร์บอนที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับหมึกพิมพ์ที่ต้องการสมบัติในการนำไฟฟ้า โดยชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ผ่านการเชื่อมโยงจนกลายเป็นฟิล์มที่แห้งแล้ว นำมาทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (4-point probe method) ตามหัวข้อที่ 3.11.3 โดยวัดค่าความต่างศักย์ (V) ที่แต่ละค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้ไป (I) เมื่อนำมาสร้างกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไป (แกน Y) กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้ (แกน X) จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละสูตร (รูปที่ 4.10) และทราบค่าสภาพต้านทาน (Resistance ; R) จากความชันของสมการเส้นตรงที่เกิดจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ (V) โดยข้อมูลต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.3 โดยจากขั้นตอนการทดสอบ พบว่า สูตร T1L1G2 และ T1L1G4 ไม่สามารถตรวจวัดค่าความต่างศักย์ได้ เนื่องจาก ทั้งสองสูตรนี้มีการใช้อนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณน้อย ทำให้ส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าระหว่างอนุภาคแกรไฟต์ และนอกจากนี้ การทดสอบโดยใช้วิธีเข็มวัด 4 จุด เป็นการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุ ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบควรมีพื้นผิวที่เรียบเพื่อให้การตรวจวัดเป็นไปอย่างถูกต้อง จากการศึกษาพื้นผิวในหัวข้อ 4.3.2 พบว่า สูตร T1L1G2 และ T1L1G4 พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยย่น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่ไม่สามารถทดสอบบนพื้นผิวที่ไม่เรียบได้ ส่วนสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 สามารถตรวจวัดค่าความต่างศักย์ด้วยวิธีนี้ได้

ค่าสภาพต้านทานของสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 ที่ได้จากกราฟนำมาสรุป และแสดงค่าในตารางที่ 4.3 และข้อมูลที่ได้นำไปคำนวณ เพื่อรายงานเป็นค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance ; R_s) จากสมการที่ 2.13

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \quad (2.13)$$

โดยที่ $R = \frac{V}{I}$

ค่า R_s ที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.3 สูตร T1L1G6 และ T1L1G8 มีค่า R_s เท่ากับ 2.3047 และ 1.8837 $k\Omega/sq$ ตามลำดับ พบว่า ค่า R_s ของสูตร T1L1G8 มีค่าน้อยกว่าสูตร T1L1G6 เนื่องจาก สูตร T1L1G8 มีปริมาณแกรไฟต์ในสูตรมากกว่า T1L1G6 ทำให้มีความต่อเนื่องกันของอนุภาคแกรไฟต์ กระแสไฟฟ้าจึงสามารถส่งผ่านบนอนุภาคที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแกรไฟต์ในหมึกพิมพ์ที่เพิ่มขึ้นสามารถลดสภาพความต้านทานของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าลงได้ โดยสมบัติความต้านทานไฟฟ้าแปรผกผันกับสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ ดังนั้น สูตร T1L1G8 จึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูงกว่า สูตร T1L1G6



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (V) ของสูตร ก) T1L1G6 และ ข) T1L1G8

ตารางที่ 4.3 ค่าสภาพต้านทาน (R) และสภาพต้านทานเชิงแผ่น (R_s) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์

สูตร	R (k Ω)	R_s (k Ω /sq)
T1L1G2	NA	NA
T1L1G4	NA	NA
T1L1G6	0.5085	2.3047
T1L1G8	0.4156	1.8837

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบจึงได้เลือกสูตร T1L1G8 ซึ่งเป็นสูตรที่แสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด จากสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของแกรไฟต์ เพื่อใช้เป็นสูตรตั้งต้นของการศึกษาผลของการใช้ออนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในหัวข้อต่อไป

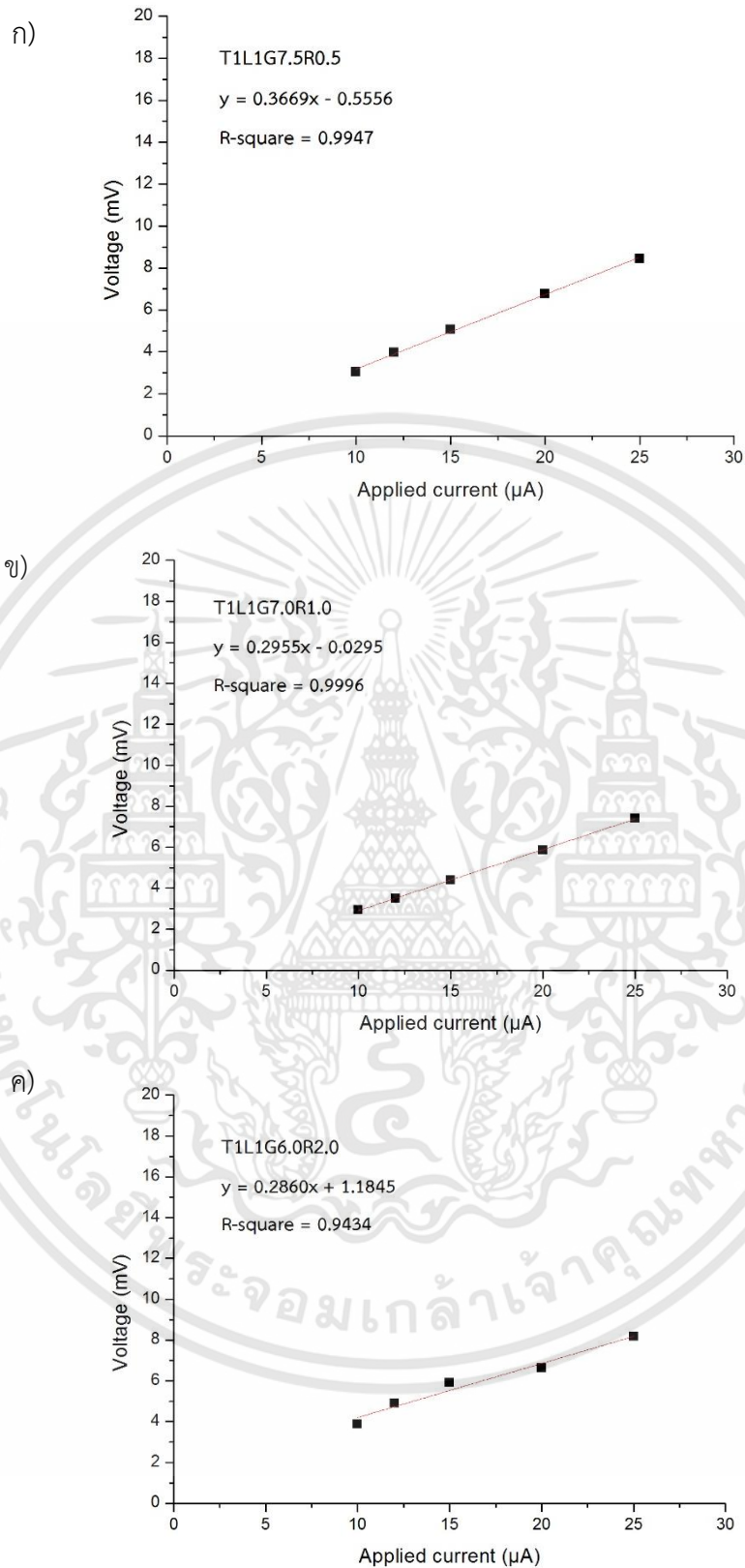
4.4 ผลของการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นอนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าอีกชนิดที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี จึงทำการศึกษาผลของการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้สูตร T1L1G8 และทำการปรับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคแกรไฟต์ : รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เป็น 7.5:0.5, 7.0:1.0 และ 6.0:2.0 ดังแสดงในตารางที่ 3.5 เพื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์เมื่อมีการปรับสัดส่วน และชนิดของคาร์บอนนำไฟฟ้า

4.4.1 ปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์

ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีการใช้ออนุภาคแกรไฟต์ร่วมกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการเชื่อมโยงโดยรังสี UV แล้ว นำมาทดสอบความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด เช่นเดียวกับหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีการใช้ออนุภาคแกรไฟต์เพียงชนิดเดียว และทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหล (I) กับ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ (V) (รูปที่ 4.11) เพื่อหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (R_s) จากความชันของสมการเส้นตรง และใช้ค่าความชันเฉลี่ยคำนวณหาค่า R_s จากสมการที่ (1) โดยข้อมูลต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.4

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ หมึกพิมพ์สูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีค่า R_s เท่ากับ 1.6629, 1.3574 และ 1.2963 $k\Omega/sq$ ตามลำดับ พบว่า สูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นองค์ประกอบมีค่า R_s ต่ำกว่าสูตร T1L1G8 ซึ่งเป็นสูตรที่ไม่มีส่วนประกอบของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และค่า R_s มีค่าต่ำลง ในสูตรหมึกพิมพ์ที่มีการใช้ออนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มากขึ้น โดย ค่า R_s มีค่าต่ำที่สุดในสูตร T1L1G6.0R2.0 ซึ่งเป็นสูตรที่มีการใช้ปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าแกรไฟต์ เนื่องจากมีการปรับอัตราส่วนการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เพียงเล็กน้อย แต่สามารถส่งผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าลดลงได้ เมื่อเทียบกับสูตรที่มีการใช้แกรไฟต์เป็นอนุภาคนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว



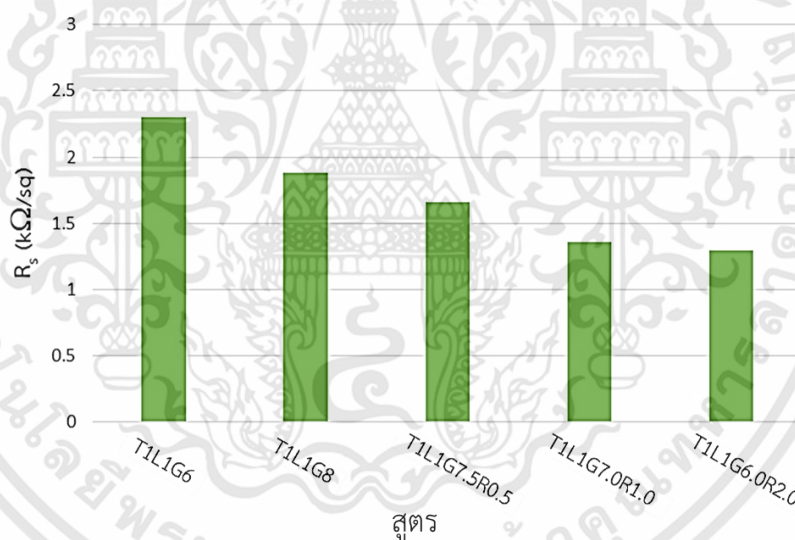
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (V) ของสูตร ก) T1L1G7.5R0.5 ข) T1L1G7.0R1.0 และ ค) T1L1G6.0R2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าสภาพต้านทาน (R) และสภาพต้านทานเชิงแผ่น (R_s) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ร่วมกับบริติชแกรไฟต์

สูตร	R ($k\Omega$)	R_s ($k\Omega/sq$)
T1L1G8	0.4156	1.8837
T1L1G7.5R0.5	0.3669	1.6629
T1L1G7.0R1.0	0.2995	1.3574
T1L1G6.0R2.0	0.2860	1.2963

จากการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ทำให้ทราบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อมีการใช้ปริมาณแกรไฟต์ที่มากขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนอนุภาคบริติชแกรไฟต์ออกไซด์ที่มากขึ้น (รูปที่ 4.12) แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ขึ้นอยู่กับปริมาณของแกรไฟต์ และสัดส่วนการใช้อนุภาคบริติชแกรไฟต์ออกไซด์ต่อแกรไฟต์ที่สูงขึ้น

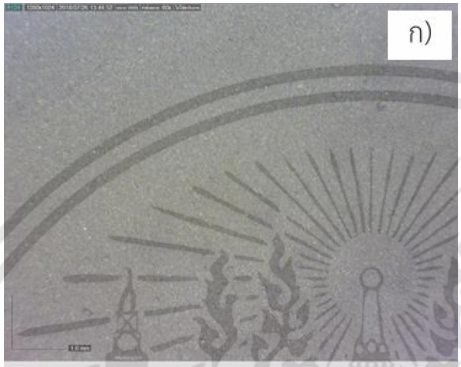
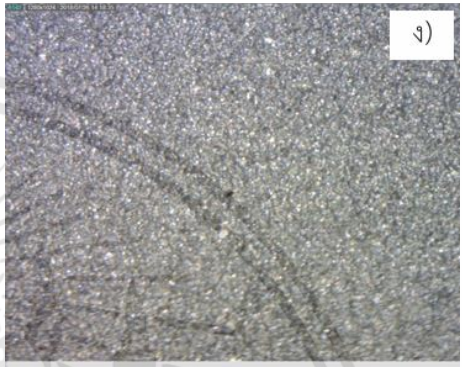

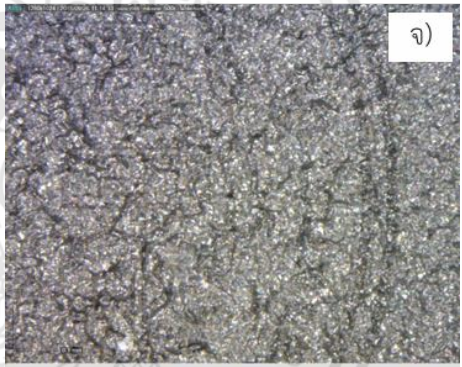

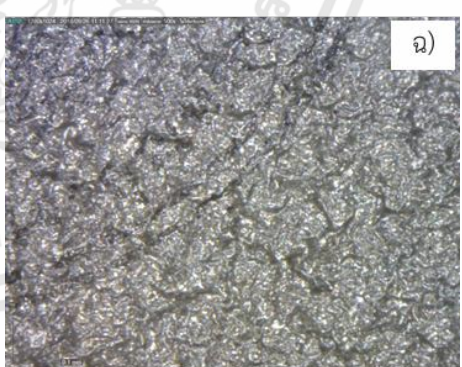


รูปที่ 4.12 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (R_s) ของหมึกพิมพ์สูตรต่าง ๆ

4.4.2 ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้แกรไฟต์ร่วมกับบริติชแกรไฟต์ออกไซด์

ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ถูกทำให้แห้งโดยการฉายรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที นำมาศึกษาพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบใช้แสงที่กำลังขยาย 60 และ 500 เท่า โดยพื้นผิวของชิ้นงานสูตร T1L1G7.5R0.5 แสดงผลดังรูปที่ 4.13 ก) และ 4.13 ง) พบว่ามีลักษณะพื้นผิวเรียบทั้งที่ใช้กำลังขยาย 60 เท่า และ 500 เท่า คล้ายกับพื้นผิวของชิ้นงานในสูตร T1L1G8 ส่วนพื้นผิวของชิ้นงานสูตร T1L1G7.0R1.0 (รูปที่ 4.13 ข) และ 4.13 จ)) และ T1L1G6.0R2.0 (รูปที่ 4.13 ค)) และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 ฉ) มีลักษณะพื้นผิวที่มีรอยย่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตร T1L1G8 เนื่องจากมีการเพิ่มปริมาณการใช้ RGO ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอนุภาคของ RGO ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของ RGO ลดลง และเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีเมื่ออยู่ในสูตรหมึกพิมพ์ ทำให้มีความสามารถในการขีดขวางการหดตัวของน้ำมันผสมเมื่อเกิดการเชื่อมโยงลดลง

สูตร	กำลังขยาย 60 เท่า	กำลังขยาย 500 เท่า
T1L1G7.5R0.5	 ก)	 ง)
T1L1G7.0R1.0	 ข)	 จ)
T1L1G6.0R2.0	 ค)	 ฉ)

รูปที่ 4.13 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกนำไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล ที่กำลังขยาย 60 เท่า ก) – ค) และ ที่กำลังขยาย 500 เท่า ง) – ฉ) ของสูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0

4.4.3 ศึกษาความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์ที่แห้งแล้ว

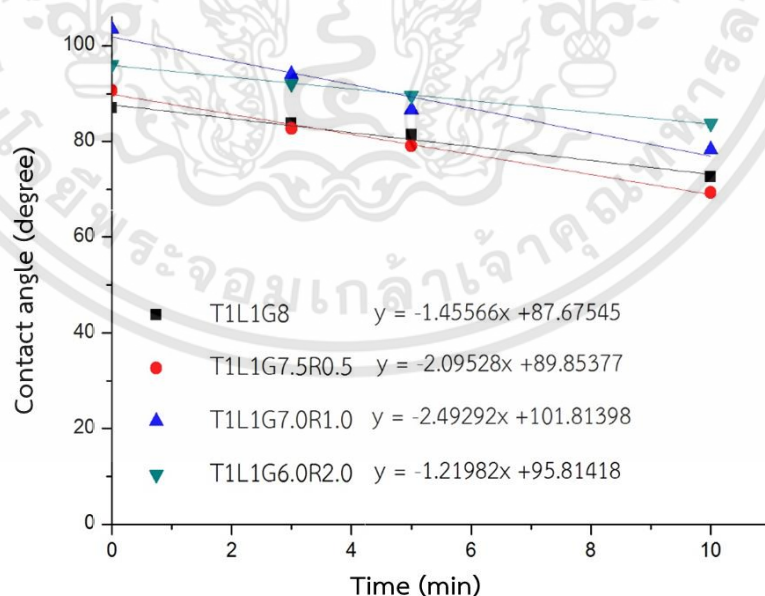
การวิเคราะห์ผลการตรวจวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน แสดงถึงความชอบน้ำของวัสดุหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ ซึ่งความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านทานน้ำของหมึกพิมพ์ โดยการศึกษาความสามารถในการต้านทานน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์มีความสำคัญต่อสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เนื่องจาก จุดประสงค์หลักในการใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า คือเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ดังนั้น น้ำ หรือความชื้นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อวงจรไฟฟ้าได้ จึงทำการทดสอบหาค่ามุมสัมผัสเพื่อศึกษาความต้านทานน้ำของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ นำไปทดสอบความสามารถในการต้านทานน้ำด้วยการหาค่ามุมสัมผัส (Contact angle) บนพื้นผิวของชิ้นงาน หากชิ้นงานมีค่ามุมสัมผัสอยู่ในช่วงน้อยกว่า 90 องศา แสดงถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดี (Wettability) และหากมีค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา สามารถบ่งบอกได้ถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี (Non-wettability) [43-45]

ค่ามุมสัมผัสของหมึกพิมพ์ที่เวลาต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ค่ามุมสัมผัสของแต่ละสูตรมีค่ามากที่สุดที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) โดย สูตร T1L1G8 มีค่ามุมสัมผัส 86.9 องศา ส่วนค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวสูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีค่าเท่ากับ 90.6, 103.4 และ 96.0 องศา ตามลำดับ แสดงถึงความสามารถในการต้านทานน้ำได้ดีของพื้นผิวชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ซึ่งให้ผลขัดแย้งจากการที่สูตรหมึกพิมพ์ที่มีองค์ประกอบของ RGO ซึ่งเป็นอนุภาคคาร์บอนที่มีธาตุออกซิเจนเหลืออยู่ในโครงสร้างบางส่วนจึงทำให้ความมีขี้ของ RGO สูงขึ้นด้วย โดยการที่มีองค์ประกอบในหมึกพิมพ์ที่มีความมีขี้ที่สูงขึ้นในหมึกพิมพ์ ค่ามุมสัมผัสที่เกิดขึ้นควรที่ค่าลดลงเนื่องจากความมีขี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความชอบน้ำของวัสดุ [48] แต่พื้นผิวของชิ้นงานสูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีลักษณะเป็นรอยย่น (รูปที่ 4.13 ง), 4.13 จ) และ 4.13 ฉ)) โดยพื้นผิวของชิ้นงานที่มีความขรุขระอาจส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของงานวิจัยของ A. Ali และคณะ [49] และเมื่อวัดค่ามุมสัมผัสของพื้นผิววัสดุที่เวลาผ่านไป พบว่าค่ามุมสัมผัสของหมึกพิมพ์ทุกสูตรมีค่าลดลงเมื่อทิ้งให้หยดน้ำอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานนานขึ้น โดยเห็นได้จากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส (ตารางที่ 4.6) เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที มุมสัมผัสของพื้นผิวชิ้นงานหมึกพิมพ์สูตร T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีการเปลี่ยนแปลงไปร้อยละ 16.6, 23.5, 24.2 และ 12.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ

สูตร	มุมสัมผัส (องศา)			
	0 นาที	3 นาที	5 นาที	10 นาที
T1L1G8	86.9	83.7	81.3	72.5
T1L1G7.5R0.5	90.6	82.7	79.1	69.3
T1L1G7.0R1.0	103.4	94.0	86.6	78.4
T1L1G6.0R2.0	96.0	92.1	89.5	83.7

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสกับเวลา (รูปที่ 4.14) ความชันจากกราฟเส้นตรงที่ได้แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสของหยดน้ำบนชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยสูตร T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเป็น 1.45, 2.09, 2.49 และ 1.22 องศา/นาที พบว่า สูตรที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสต่ำที่สุดคือ สูตร T1L1G6.0R2.0 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานมีพื้นผิวที่มีความชอบน้ำต่ำกว่าชิ้นงานหมึกพิมพ์สูตรอื่น ๆ แต่ยังมีการแทรกซึมของน้ำเข้าไปยังชิ้นงานหมึกพิมพ์ได้ เนื่องจาก ในอัตราส่วนองค์ประกอบของหมึกพิมพ์มีการใช้ปริมาณคาร์บอนนำไฟฟ้าสูงอาจทำให้น้ำมันผสมไม่สามารถล้อมรอบอนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าได้ทั้งหมด เกิดเป็นช่องว่างขนาดเล็กขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในชิ้นงาน และทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าลดลงได้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสกับเวลาของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตร T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 3, 5 และ 10 นาที

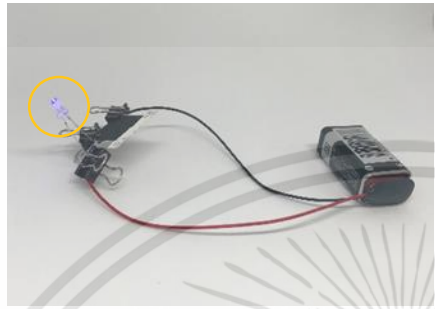
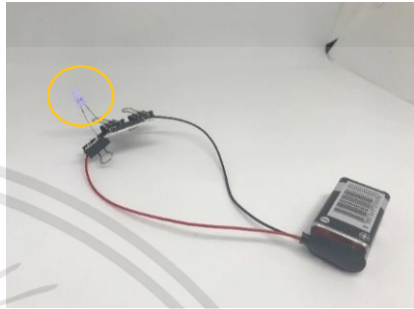
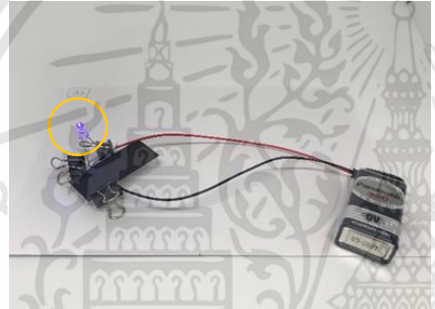
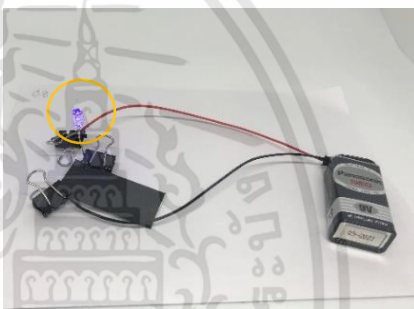
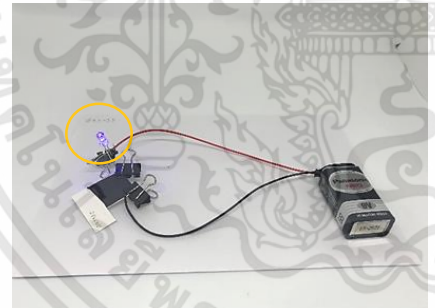
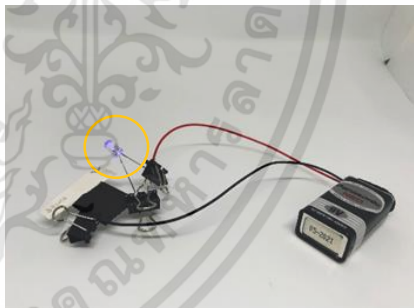
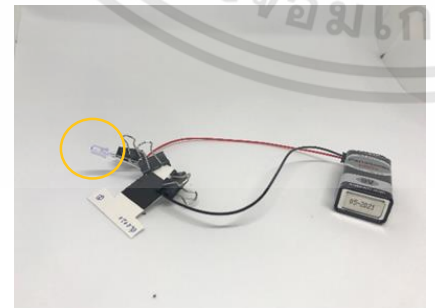
สูตร	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส			อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส (องศา/นาที)
	3 นาที	5 นาที	10 นาที	
T1L1G8	3.7	6.4	16.6	1.5
T1L1G7.5R0.5	8.7	12.7	23.5	2.1
T1L1G7.0R1.0	9.1	16.3	24.2	2.5
T1L1G6.0R2.0	4.1	6.7	12.8	1.2

4.5 การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร

การประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจรเป็นการจำลองจากการใช้งานจริง โดยทำการประกอบวงจรตามหัวข้อที่ 3.11.5 โดยใช้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตร T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6, T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 เป็นส่วนหนึ่งของวงจร ภาพการประกอบวงจรไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยพบว่าชิ้นงานทุกสูตรสามารถทำให้หลอด LED เกิดแสงสว่างขึ้นได้ และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสว่างของหลอดไฟ LED ในสูตรที่ใช้แกรไฟต์เป็นองค์ประกอบ (T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8) พบว่า สูตร T1L1G2 และ T1L1G4 มีความสว่างของหลอดไฟ LED น้อยกว่าสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 แสดงให้เห็นว่า สูตร T1L1G2 และ T1L1G4 ซึ่งเป็นสูตรที่มีปริมาณแกรไฟต์ในหมึกพิมพ์น้อย มีความสามารถในการนำไฟฟ้าน้อยกว่าสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 ซึ่งใช้ปริมาณแกรไฟต์ที่มากกว่า เนื่องจากเป็นผลของความต่อเนื่องกันของอนุภาคแกรไฟต์ที่ส่งผลต่อการส่งต่อกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวของหมึกพิมพ์ โดยในสูตรหมึกพิมพ์ที่มีปริมาณแกรไฟต์น้อย (T1L1G2 และ T1L1G4) มีความต่อเนื่องกันของอนุภาคแกรไฟต์ไม่ดีเนื่องจากมีปริมาณแกรไฟต์ที่ไม่มากพอ ทำให้มีการส่งต่อกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวชิ้นงานหมึกพิมพ์ไม่ดีเท่าที่ควร จึงส่งผลให้ความสว่างของหลอดไฟ LED ไม่มากเท่าชิ้นงานหมึกพิมพ์สูตรที่ใช้ปริมาณแกรไฟต์ที่มากกว่า และยังสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า (หัวข้อที่ 4.3.3)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตร T1L1G8 กับ สูตรที่ปรับอัตราส่วนการใช้ RGO (สูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0) พบว่า สูตร T1L1G7.5R0.5 มีความสว่างใกล้เคียงกับสูตร T1L1G8 อย่างไรก็ตาม สูตร T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีความสว่างน้อยกว่าสูตร T1L1G7.5R0.5 อย่างชัดเจน อาจเป็นผลเนื่องจากอนุภาค RGO ที่มีลักษณะเป็นแผ่นที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับขนาดของผงแกรไฟต์ ดังผลที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1 เมื่อเติมอนุภาค RGO ไปแทนที่การใช้แกรไฟต์บางส่วน ทำให้ RGO ซึ่งอยู่ในลักษณะของการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนมีการกระจายตัวในหมึกพิมพ์ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องมาจากสภาพผิวของ RGO ที่มีความแตกต่างจากน้ำมันผสม และแรงที่ใช้ในการผสมไม่มากพอที่ทำให้ RGO กระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในหมึกพิมพ์ ส่งผลให้อนุภาค RGO เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความไม่ต่อเนื่องกัน เมื่อนำไปพิมพ์เป็นชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจึงส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ และทำให้ความสว่างของหลอดไฟ LED ลดลง

สูตร	ภาพวงจร	สูตร	ภาพวงจร
T1L1G2		T1L1G4	
T1L1G6		T1L1G8	
T1L1G7.5R0.5		T1L1G7.0R1.0	
T1L1G6.0R2.0			

รูปที่ 4.15 ตัวอย่างการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยใช้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร และใช้ถ่านไฟฉาย 9V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการจำลองประกอบวงจรโดยสังเกตความสว่างของหลอดไฟ LED พบว่าให้ผลขัดแย้งกับผลการนำไฟฟ้าในหัวข้อที่ 4.4.1 ที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการใช้ RGO กับสภาพความต้านทานเชิงแผ่น (R_s) โดยค่า R_s ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนในการใช้ RGO : แกรไฟต์มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุจากการตรวจวัดค่าสภาพความต้านทานจากวิธีเข็มวัดที่จุดเป็นการตรวจวัดบนพื้นที่เล็ก ๆ บนชิ้นงาน ทำให้มีค่าสภาพความต้านทานเชิงแผ่นของชิ้นงาน ที่มีอนุภาค RGO กระจายตัวอยู่บนชิ้นงานมีค่าต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ โดยกราฟที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงานสูตร T1L1G6.0L2.0 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ค) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9434 แสดงถึงการกระจายของค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับสูตรที่มีปริมาณ RGO น้อยกว่า (สูตร T1L1G7.5R0.5; $R^2=0.9947$ (รูปที่ 4.11 ก) และสูตร T1L1G7.0R1.0; $R^2=0.9996$ (รูปที่ 4.11 ข)) รวมถึงสูตร T1L1G8 ซึ่งไม่มีการเติม RGO (สูตร T1L1G8; $R^2=0.9978$ (รูปที่ 4.10 ข)) ซึ่งแสดงถึงในแต่ละบริเวณของพื้นผิวชิ้นงานมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน และนอกจากนี้ผลการศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์ที่ได้จากรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า (รูปที่ 4.13) พบว่า ชิ้นงานหมึกพิมพ์สูตร T1L1G7.0L1.0 และ T1L1G6.0L2.0 มีรอยร่น คาดว่าเกิดจากการหดตัวของหมึกพิมพ์เมื่อเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง อาจทำให้เกิดการแยกออกจากกันของอนุภาคของคาร์บอนนำไฟฟ้าบนชิ้นงานหมึกพิมพ์เกิดการกระจายตัวที่ไม่เท่ากัน แม้มีการทำให้อนุภาคคาร์บอนเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในขั้นตอนการผสมแล้วก็ตาม ด้วยสาเหตุนี้ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของอนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าบนชิ้นงาน จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าของชิ้นงานหมึกพิมพ์ลดลงเมื่อนำชิ้นงานมาประกอบเป็นวงจรไฟฟ้า

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซีไดซ์, ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์, และน้ำมันชักแห้ง ซึ่งได้แก่ น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง โดยใช้แกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นอนุภาคนำไฟฟ้า โดยได้ทำการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และพิสูจน์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้าที่ใช้เป็นองค์ประกอบของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า และทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของน้ำมันทังต่อน้ำมันลินสีดที่ส่งผลต่อการแห้งเมื่อฉายรังสี UV และศึกษาผลของการใช้แกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ ได้แก่ ระยะเวลาในการแห้งผิว, ลักษณะพื้นผิวหมึกพิมพ์เมื่อแห้ง, ความชอบน้ำของพื้นผิวชิ้นงานของฟิล์มหมึกพิมพ์ และสมบัติทางไฟฟ้า จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า พบว่าหมู่ฟังก์ชันมีการเปลี่ยนแปลง โดยพบหมู่ฟังก์ชันที่มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้นในโครงสร้างเมื่อนำแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นแกรฟีนออกไซด์ (XGO) และพบว่าหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวลดลงเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันเป็นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO) ซึ่งยืนยันได้จากผลของ FTIR และผลที่ได้จาก XRD แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแกรไฟต์ไปเป็น RGO ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ นอกจากนี้อนุภาคของ RGO ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแกรไฟต์ตั้งต้นที่ใช้นำมาสังเคราะห์

ผลของอัตราส่วนการใช้ น้ำมันชักแห้งต่อการแห้งผิวของสูตรน้ำมันผสมได้ทำการศึกษาระยะเวลาในการทำให้สูตรน้ำมันผสมเกิดการแห้งที่ผิวหลังได้รับรังสี UV พบว่า สูตร T1L1 เป็นสูตรที่ใช้อัตราส่วนของน้ำมันทังน้อยที่สุดที่ทำให้เริ่มเกิดการแห้งที่ผิวด้วยเวลา 10 นาที ซึ่งเป็นเวลาน้อยที่สุดที่เกิดการแห้งผิวของสูตรน้ำมันผสม จึงเลือกสูตร T1L1 เป็นสูตรน้ำมันผสมตั้งต้นในการนำมาเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

การศึกษาสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้แกรไฟต์เป็นอนุภาคนำไฟฟ้า โดยได้ศึกษาปริมาณการใช้แกรไฟต์ที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า พบว่า หมึกพิมพ์สูตร T1L1G4, T1L1G และ T1L1G8 สามารถแห้งที่ผิวได้อย่างสมบูรณ์เมื่อได้รับการฉาย UV เป็นเวลา 10 นาที ส่วนพื้นผิวของหมึกพิมพ์มีลักษณะเรียบมากขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น โดยมีพื้นผิวที่เรียบที่สุดในสูตร T1L1G8 นอกจากนี้ปริมาณแกรไฟต์ที่เติมลงในหมึกพิมพ์ยังส่งผลต่อค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงานด้วย จากผลการทดสอบพบว่าสูตร T1L1G8 เป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ของแกรไฟต์ที่มีค่าสภาพความต้านทานต่ำที่สุด

การศึกษาสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้อนุภาคแกรไฟต์ร่วมกับอนุภาค RGO โดยทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาปริมาณ RGO ที่ใส่เข้าไปแทนที่แกรไฟต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ค่าสภาพความต้านทานของ ชีงงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีค่าลดลง ในสูตรที่มีอัตราส่วนการใช้ RGO เพิ่มสูงขึ้น โดยสูตร T1L1G6.0R2.0 เป็นสูตรที่มีค่าสภาพความต้านทานต่ำที่สุด นอกจากนี้ สูตร T1L1G6.0R2.0 ยังเป็น สูตรที่มีความชอบน้ำต่ำที่สุดด้วย

ผลที่ได้จากการทดสอบต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ทำให้สรุปได้ว่า งานวิจัยนี้สามารถเตรียมหมึก พิมพ์นำไฟฟ้าฐานน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งลดการปลดปล่อยไอระเหยที่เป็นพิษ ทำให้มีความปลอดภัยต่อ ผู้ใช้งาน และสิ่งแวดล้อม โดยสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสมบัติทางไฟฟ้าดีที่สุด คือ สูตร T1L1G8 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้อัตราส่วนน้ำมันผสมต่อแกรไฟต์เป็น 5:4 ส่วนโดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่ามีค่าสภาพต้านทานสูง กว่าสูตรที่ใช้คาร์บอนนำไฟฟ้าเป็นแกรไฟต์ร่วมกับ RGO (สูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0) แต่จากการจำลองการต่อวงจรไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าสูตร T1L1G8 มีลักษณะพื้นผิว เรียบ และมีการกระจายของอนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอในทุกบริเวณมากกว่าเมื่อพิมพ์ เป็นชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับขั้นตอนการใช้งาน ลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้หมึกพิมพ์แห้งตัวเมื่อพิมพ์เป็น ชิ้นงาน โดยอาจทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีการเชื่อมโยงได้เร็วมากขึ้น ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อ ระยะเวลาในการเก็บรักษา
2. ในขั้นตอนการเตรียมหมึกพิมพ์ ควรใช้เครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการกระจาย RGO ในน้ำมันผสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alexander, K. and Shlomo, M. “Conductive Nanomaterials for Printed Electronics.” *Small*. 10 (2014) : 3515-3535.
- [2] Aline, M. and Patrick, V. **Water-based screen printing ink**. W.O patent no. 2003020835 A1. August 2002.
- [3] Kamyshny, A. Steinke, J. and Magdassi, S. 2011. “Metal based inkjet inks for printed electronics.” *The Open Applied Physics*. 4 (2011) : 19–36.
- [4] Bhushan, H. P. 2015. “Formulation and Evaluation of Soy Polymer Based, Gravure Printed Resistive Inks for Applications in Printed Electronics.” Master's Thesis of Western Michigan University.
- [5] เรย์มอน, แซง. 2546. เคมี 1. แปลจาก **CHEMISTRY**. โดย นภดล ไชยคำ, พีรวรรณ พันธุมนาวิน และ ลัดดาวัลย์ ผดุงทรัพย์. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล.
- [6] Chris, P. Awadh, A. A. Sarah, J. P. Tim, C. and Davide, D. “The Effect of Graphite and Carbon Black Ratios on Conductive Ink Performance.” *Materials Science*. 52 (2017) : 9520-9530.
- [7] Ethan, B. S. Theodore, Z. G. Ahmad, E. I. Rahul, R. Shay, G. W. Jian, Z. Karl, W. P. Benji, M. and Mark, C. H. “Enhanced Conductivity, Adhesion, and Environmental Stability of Printed Graphene Inks with Nitrocellulose.” *Chemistry of Material*. 29 (2017) : 2332-2340.
- [8] Ana, C. A. J. Devin, M. Iain. M. Jonathan, R. and Alberto, S. “Materials and Applications for Large Area Electronics- Solution Based approaches.” *Chemical Reviews*. 110 (2010) : 3–24.
- [9] Jia, S. Bo, Z. and Howard, E. K. “Materials for Printable, Transparent, and Low-Voltage Transistors.” *Advanced Functional Materials*. 21 (2011) : 29-45.
- [10] Titkov, A. I. Bukhanets, O. G. Gadirov, R. M. Yukhin, Yu. M. and Lyakhov N. Z. “Conductive Inks for Inkjet Printing Based on Composition of Nanoparticles and Organic Silver Salt.” *Inorganic Materials: Applied Research*. 6 (2015) : 375–381.
- [11] Ethan, B. S. Pradyumna, L. P. Kanan, P. Michael, L. G. and Mark, C. H. “Inkjet Printing of High Conductivity, Flexible Graphene Patterns.” *Physical Chemistry Letter*. 4 (2013) : 1347–1351.
- [12] Veronika, H. Alexandra, P. Paul, D. F. Mike, K. Hiroyuki, F. and Kathy, R. “Graphene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Inks for Printed Electronics.”, *Advances in Printing and Media Technology*,
Editors: Edlund N., Lovrecek M. 39 (2012) : 53-59.
- [13] Anke, K. 2010. **Carbon Materials and Nanotechnology**. Weinheim : WILEY-VCH.
- [14] Maheshwar, S. and Madhuri, S. 2010. **Carbon Nanoforms and Applications**. New York : McGraw-Hill.
- [15] Santosh, K. T. Vijay, K. Andrzej, H. Oraon, R. Adhikari ,A. D. and Nayak, G. C. “Magical Allotropes of Carbon: Prospects and Applications.” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 41 (2016) : 257-317.
- [16] ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ. 2560. “แกรฟีน วัสดุ 2 มิติ เพื่ออนาคต.” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*. (84) : 65-70.
- [17] H.-S. Philip, W. and Deri, A. 2011. **Carbon Nanotube and Graphene Device Physics**. New York : Cambridge University Press.
- [18] RAKHI A. 2017. **This is How Scotch Tape, a Couple of Geniuses and a Little Luck Led to a Noble Prize in Physics**. [Online]. Available : <https://www.indiatimes.com/lifestyle/self/this-is-how-scotch-tape-a-couple-of-geniuses-and-a-little-luck-led-to-a-noble-prize-in-physics-323247.html>.
- [19] Choi, W. and Lee, J.-W. 2012. **Graphene Synthesis and Applications**. Florida : CRC Press Taylor & Francis Group.
- [20] วิศณุสรุรงค์ ชาตอารยะวดี. 2013. “แกรฟีน ตอนที่ 1 : การสังเคราะห์คาร์บอนรูปแบบใหม่.” *วารสารนเรศวรพะเยา*. 6 (1) : 10-24.
- [21] Zhang, y. Small, J.P. Pontius, W.V. and Kim, P. “Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices.” *Applied Physics Letters*. 86 (2005) : 073104.
- [22] Lu, X.K. Yu, M.F. Huang, H. and Ruoff, R.S. “Tailoring graphite with the goal of achieving single sheets.” *Nanotechnology*. 10 (1999) : 269-272.
- [23] Chun, K. C. and Martin, P. “Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint.” *Chemical Society Reviews*. 43 (2014) : 291-312.
- [24] ภัทรารุณ มนต์วิเศษ. 2560. “เอกสารประกอบการสอนวิชา พอลิเมอร์ชีวภาพ.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [25] Robert D.M. and Peter A.B. **Rumen Bypass Supplement**. U.S patent no. 6890548 B1. March 2003.
- [26] อิทธิพล แจ่มชัด. 2544. “เอกสารประกอบการสอน วิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] polymerdatabase.com. 2015. **ENR-Epoxyrenes Epoxidized Natural Rubber**. [Online]. Available : <http://polymerdatabase.com/Elastomers/ENR.html>.
- [28] เพลินพิศ บุชาธรรม. 2558. **CNR ยางธรรมชาติมูลค่าเพิ่มสูงชนิดใหม่**. [ออนไลน์]. Available : http://rubber.oie.go.th/rrd/file/presentationCNR_25_June_2015.pdf.
- [29] Hummers, W. and Offeman, R. "Preparation of Graphitic Oxide." *Journal of the American Chemical Society*. 80 (1958) : 1339-1339.
- [30] Chen, J. Yao, B. Li, C. and Shi, G. "An Improved Hummers Method for Eco-friendly Synthesis of Graphene Oxide." *Carbon*. 64 (2013) : 225-229.
- [31] Wanshuang, L. Rui, Z. Dan, Z. Guoqiang, D. Jie, M. S. Chee, Y. Y. and Xuehong, L. "Lignin-assisted Direct Exfoliation of Graphite to Graphene in Aqueous Media and Its Application in Polymer Composites." *Carbon*. 83 (2015) 188–197.
- [32] Nadia, A. Y. Nadia, G. K. Mohamed, A. A. and Nabel, A. N. "Preparation and Characterization of Polymeric Dispersants Based on Vegetable Oils for Printing Ink Application." *Progress in Organic Coatings*. 111 (2017) : 354–360.
- [33] Manisha, P. Aparna, K. Omprakash, Y. Viresh, T. and Kisan, K. "Biodegradable Bioepoxy Resins Based on Epoxidized Natural Oil (Cottonseed & Algae) Cured with Citric and Tartaric Acids Through solution Polymerization: A Renewable Approach." *Industrial Crops and Products*. 89 (2016) : 434–447.
- [34] Karmalm, P. Hjertberg, T. Jansso, n A. Dahl, R. and Ankner, K. "Network Formation by Epoxidised Soybean Oil in Plastisol Poly(vinyl chloride)." *Polymer Degradation and Stability*. 94 (2009) : 1986–1990.
- [35] พงศ์ยุทธ จันทอง, สุชปา เนตประดิษฐ์ และธนธร ทองสัมฤทธิ์. 2550. การผลิต และพัฒนาหมึกพิมพ์สกรีนที่มีตัวทำละลายฐานน้ำมันถั่วเหลืองเพื่อสิ่งแวดล้อม. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [36] Oyman, Z., Ming, W. and Linde, R. "Oxidation of Drying Oils Containing Non-conjugated and Conjugated Double Bonds Catalyzed by a Cobalt Catalyst." *Progress in Organic Coatings*. 54 (2005). : 198-204.
- [37] ธันย์จิรา บัวนุช, วิศวารรณ อยู่เจริญ และวิลาสินี ราชีกฤษ. 2559. การพัฒนาหมึกพิมพ์เอทิงฐานน้ำมันสำหรับภาพพิมพ์. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [38] ASTM D 3359 Committee on standard. "Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test 2017."

- [39] Andrijanto, E. Shoelarta, S. Subiyanto, G. and Rifki, S. 2015. "Facile Synthesis of Graphene from Graphite Using Ascorbic Acid as Reducing Agent." 020003-1 - 020003-4. in **The 3rd International Conference on Advanced Materials Science and Technology (ICAMST 2015)**. Semarang : The Grasia Hotel.
- [40] Rathnayake, R.M.N.M. Wijayasinghe, H.W.M.A.C. Pitawala, H.M.T.G.A. Yoshimurac, M. and Huang, H. H. "Synthesis of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide by Needle Platy Natural Vein Graphite." *Applied Surface Science*. 393 (2017): 309–315.
- [41] Abdolhosseinzadeh, S. Asgharzadeh, H. and Kim, H. S. "Fast and Fully-scalable Synthesis of Reduced Graphene Oxide." *Scientific Reports*. 5 (2015): 10160.
- [42] Hof, F. Kampioti, K., Huang, K., Jaillet, C., Derré, A., Poulin, P., Yusof, H. White, T. Koziol, K. Paukner, C. and Pénicaud, A. "Conductive Inks of Graphitic Nanoparticles From a Sustainable Carbon Feedstock." *Carbon*. 111 (2017): 142-149.
- [43] Li, J. Zhang, H. Gao, M. Li, Q. Bian, W. Tao, T. and Zhang, H. "High-Temperature Wettability and Interactions between Y-Containing Ni-Based Alloys and Various Oxide Ceramics." *Materials*. 11 (2018): 749.
- [44] Dezellus, O. and Eustathopoulos, N. "Fundamental Issues of Reactive Wetting by Liquid Metals." *Journal of Materials Science*. 45 (2010): 4256-4264.
- [45] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2558. ภาวะการเปียก. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%B0%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%81>
- [46] Loryuenyong, V. Totepvimarn, K. Eimburanaprat, P. Boonchompoo, W. and Buasri, A. " Preparation and Characterization of Reduced Graphene Oxide Sheets via Water-Based Exfoliation and Reduction Methods." *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013 (2013).
- [47] Badri, M.A.S. Salleh, M.M. Noor, N.F.A.M. Rahman, M.Y.A. and Umar, A.A.. "Green Synthesis of Few-layered Graphene from Aqueous Processed Graphite Exfoliation for Graphene Thin Film Preparation." *Materials Chemistry and Physics*. 193(2017). 212-219.
- [48] Lee, J. and Lee, B. "A Simple Method to Determine the Surface Energy of Graphite." *Carbon Letters*. 21 (2017): 107-110.

- [49] Adnan, A. Ahsan, R. Khalid, R. Nauman, M. Malik, M. Arshad, K. Ko, J.B. Saleem, K. Yang, B.S. Kim, H.C. Doh, Y.H. Kim, D.S. and Choi, K.H. “Printed Patterns Adhesion dependency on Contact Angle of Ink on Substrate.” *International Journal of Engineering & Technology*. 10(01) (2010) : 72-75.
- [50] เจริญชัย เหลืองอ่อน. 2554. “การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ* (62) : 74-79.
- [51] Miccoli, I. Edler, F. Pfnür, H. and Tegenkamp, C. “The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems.” *Physics: Condensed Matter*. 27(22) (2015) : 223201.
- [52] Paul, F. 2002. “EECS 143 Microfabrication Technology.” Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, Berkeley University of California.

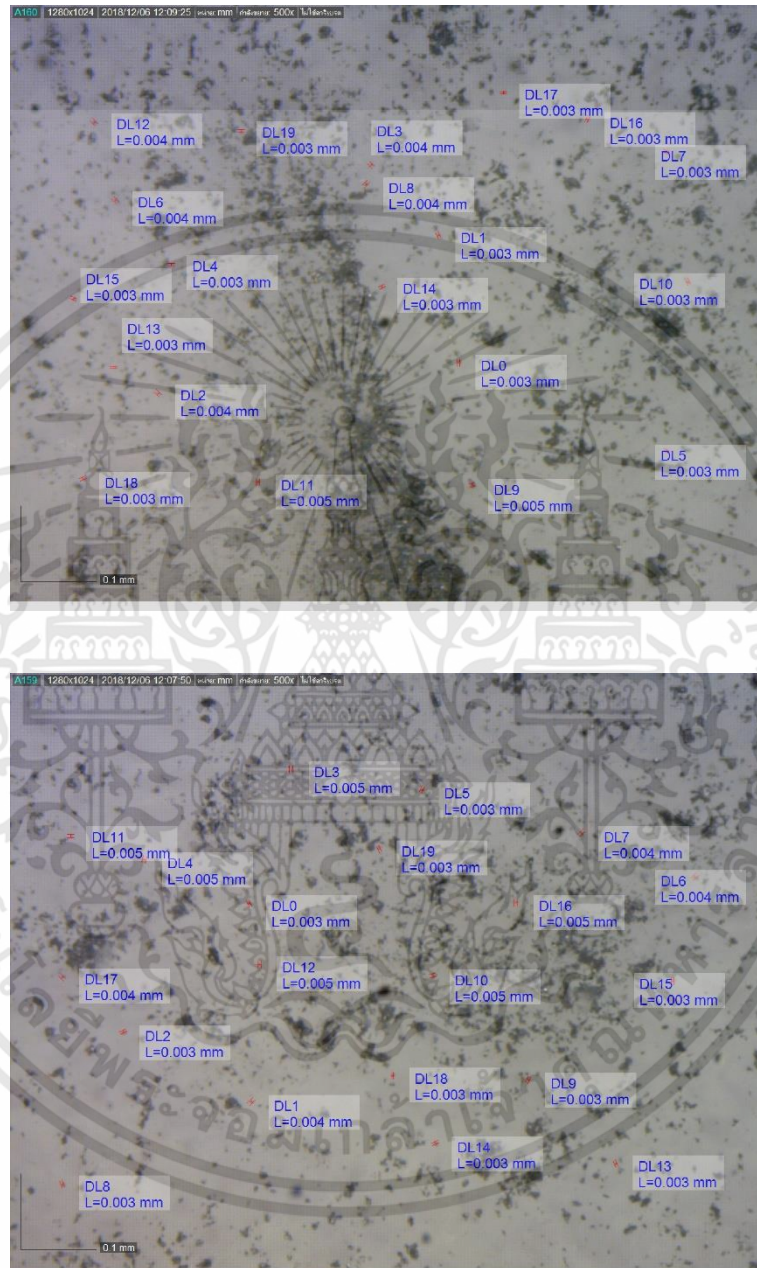




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

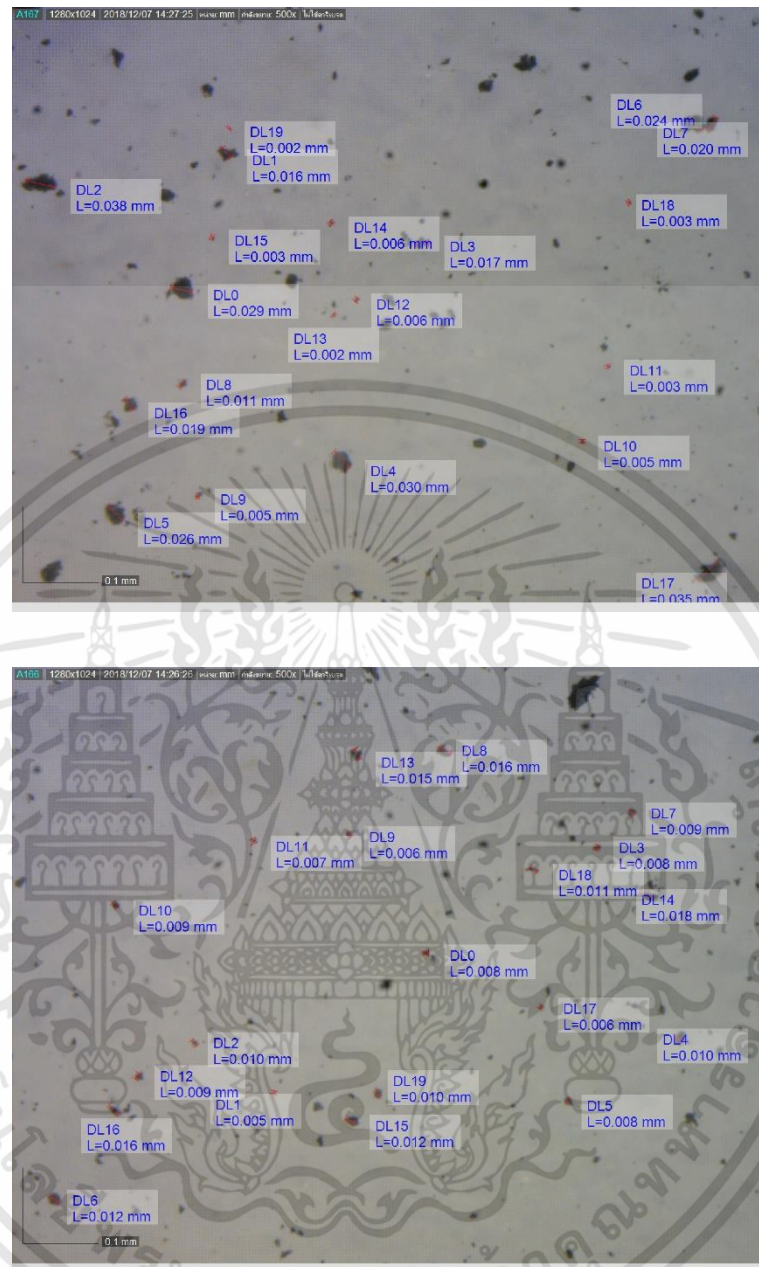
ภาคผนวก ก

อนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้า



รูปที่ ก 1 รูปถ่ายอนุภาคแกรไฟต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 500 เท่า

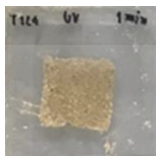
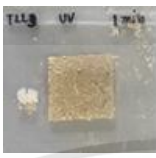



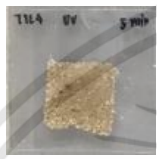

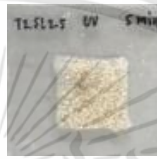
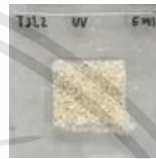
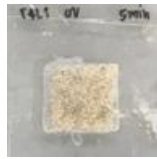

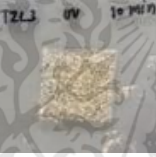

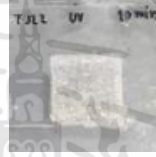
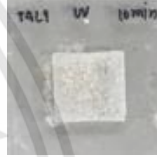
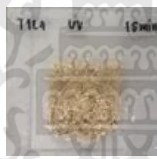
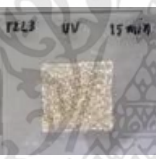

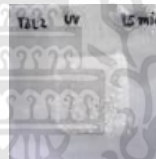




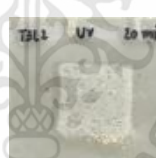
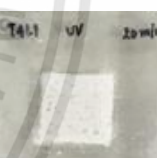

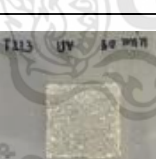
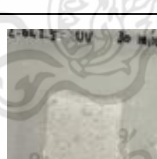
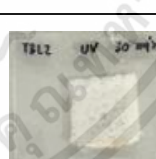
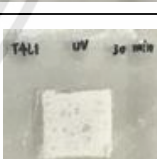

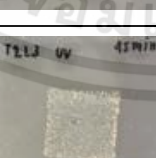
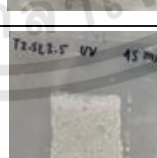
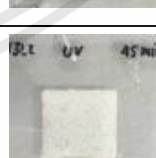
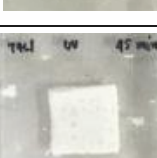
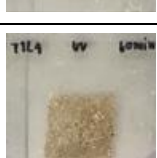


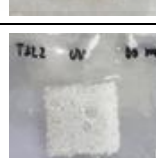
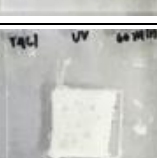
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก 2 รูปถ่ายอนุภาคคาร์บอนไฟเบอร์ที่เคลือบด้วยออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 500 เท่า

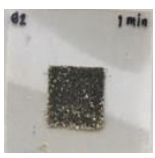
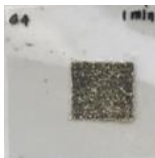
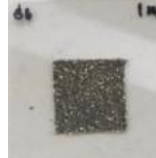

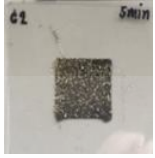
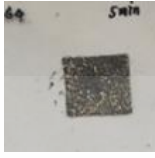
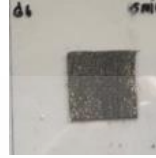



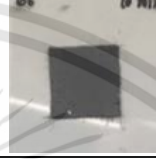
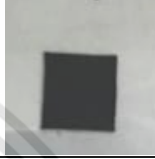




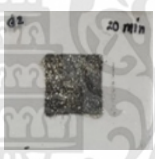
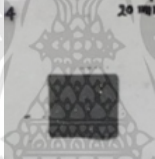






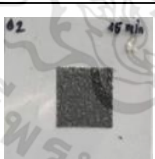
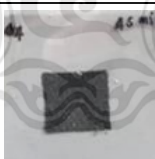
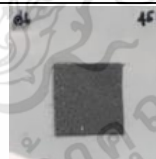

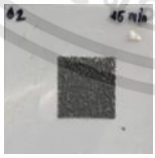
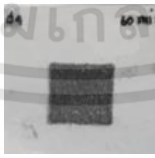
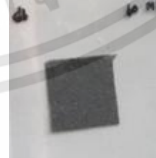

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การทดสอบการแห้งผิว

เวลา	T1L4	T2L3	T1L1	T3L2	T4L1
1 นาที					
5 นาที					
10 นาที					
15 นาที					
20 นาที					
30 นาที					
45 นาที					
60 นาที					

รูปที่ ข 1 ชิ้นงานน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบการแห้งที่ผิว เมื่อได้รับรังสี UV ที่เวลาแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	T1L1G2	T1L1G4	T1L1G6	T1L1G8
1 นาที				
5 นาที				
10 นาที				
15 นาที				
20 นาที				
30 นาที				
45 นาที				
60 นาที				

รูปที่ ข 2 ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบการแห้งที่ผิว เมื่อได้รับรังสี UV ที่เวลาแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัดสี่จุด

ตารางที่ ค 1 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G6 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชั้นงานต่างกัน

Applied current (μA)	10	12	15	20	25	
Voltage(mV)	4.9	5.9	7.9	10.4	13.2	
	ชั้นที่ 1	6.1	7.2	9.2	12.1	15.1
		4.7	5.5	7.1	9.6	11.7
	ชั้นที่ 2	3.7	4.5	4.9	7.1	9.4
		4.2	4.9	6.3	8.3	10.4
		3.1	3.8	6.4	6.3	7.8
ชั้นที่ 3	4.3	5.0	6.7	9.1	11.4	
	5.7	6.9	7.5	11.5	14.7	
เฉลี่ย	4.9	5.8778	7.4667	9.9444	12.5333	
sd	1.3181	1.6551	1.8351	2.7102	3.4205	

ตารางที่ ค 2 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G8 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชั้นงานต่างกัน

Applied current (μA)	10	12	15	20	25	
Voltage(mV)	3.9	4.5	5.9	8	10	
	ชั้นที่ 1	6.0	6.9	9.2	12.2	15.3
		7.0	8.4	10.8	16.1	18.9
	ชั้นที่ 2	3.3	4.1	5.4	7.2	9.0
		4.0	5.1	5.2	8.2	10.4
		3.2	3.9	4.8	6.6	8.5
ชั้นที่ 3	2.3	2.7	3.5	4.6	5.9	
	2.5	2.9	3.9	5.2	6.6	
เฉลี่ย	3.8111	4.5556	5.7333	8.0556	10.0111	
sd	1.6796	1.9881	2.6306	3.8442	4.4627	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 3 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G7.5R0.5 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน
ต่างกัน

Applied current (μA)		10	12	15	20	25
Voltage(mV)	ชั้นที่ 1	2.8	4.0	5.2	6.5	8.1
		3.1	4.1	4.6	6.2	7.8
		2.9	3.6	5.6	7.6	9.6
	ชั้นที่ 2	2.6	4.1	5.1	6.7	8.4
		2.9	4.4	5.6	7.4	9.3
		3.5	3.4	4.2	5.7	7
	ชั้นที่ 3	2.9	3.4	4.4	6	7.5
		3.2	4.7	5.8	7.8	9.9
		3.5	3.9	5.1	7	8.4
	เฉลี่ย	3.0444	3.9556	5.0667	6.7667	8.4444
	sd	0.3087	0.4391	0.5635	0.7365	0.9812

ตารางที่ ค 4 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G7.0R1.0 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน
ต่างกัน

Applied current (μA)		10	12	15	20	25
Voltage(mV)	ชั้นที่ 1	3.8	4.6	5.7	7.4	8.8
		3.1	3.6	4.6	6.0	9.3
		3.5	4.2	5.3	7.2	7.6
	ชั้นที่ 2	2.7	3.2	4	5.5	7.8
		2.9	3.5	4.3	5.7	7.1
		2.9	3.4	4.3	5.8	7.2
	ชั้นที่ 3	2.4	2.8	3.5	4.7	5.9
		2.3	2.8	3.5	4.8	6.0
		2.9	3.4	4.2	5.6	7.0
	เฉลี่ย	2.9444	3.5	4.3778	5.8556	7.4111
	sd	0.4799	0.5916	0.7396	0.9275	1.1330

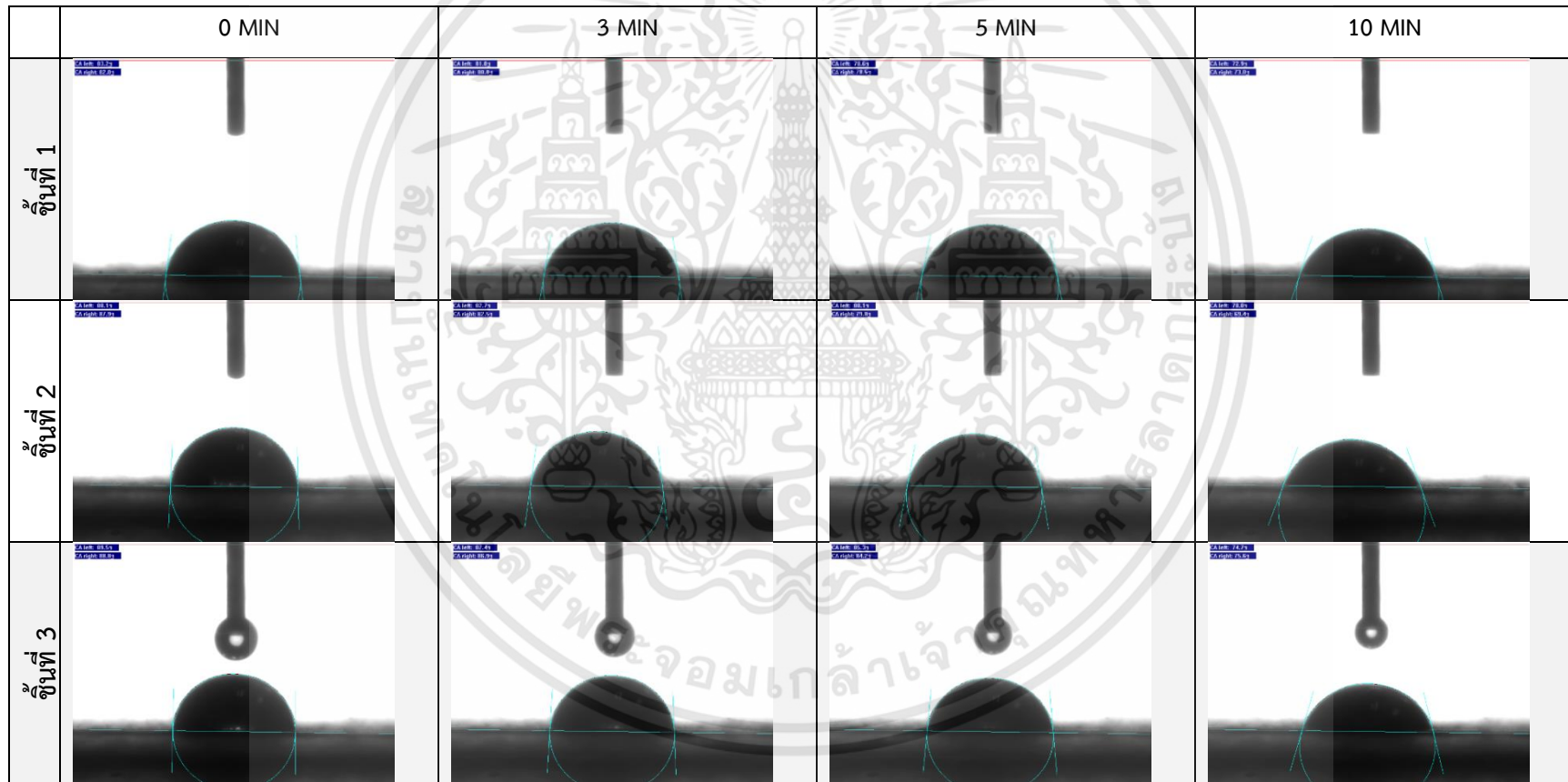
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 5 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G6.0R2.0 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน
ต่างกัน

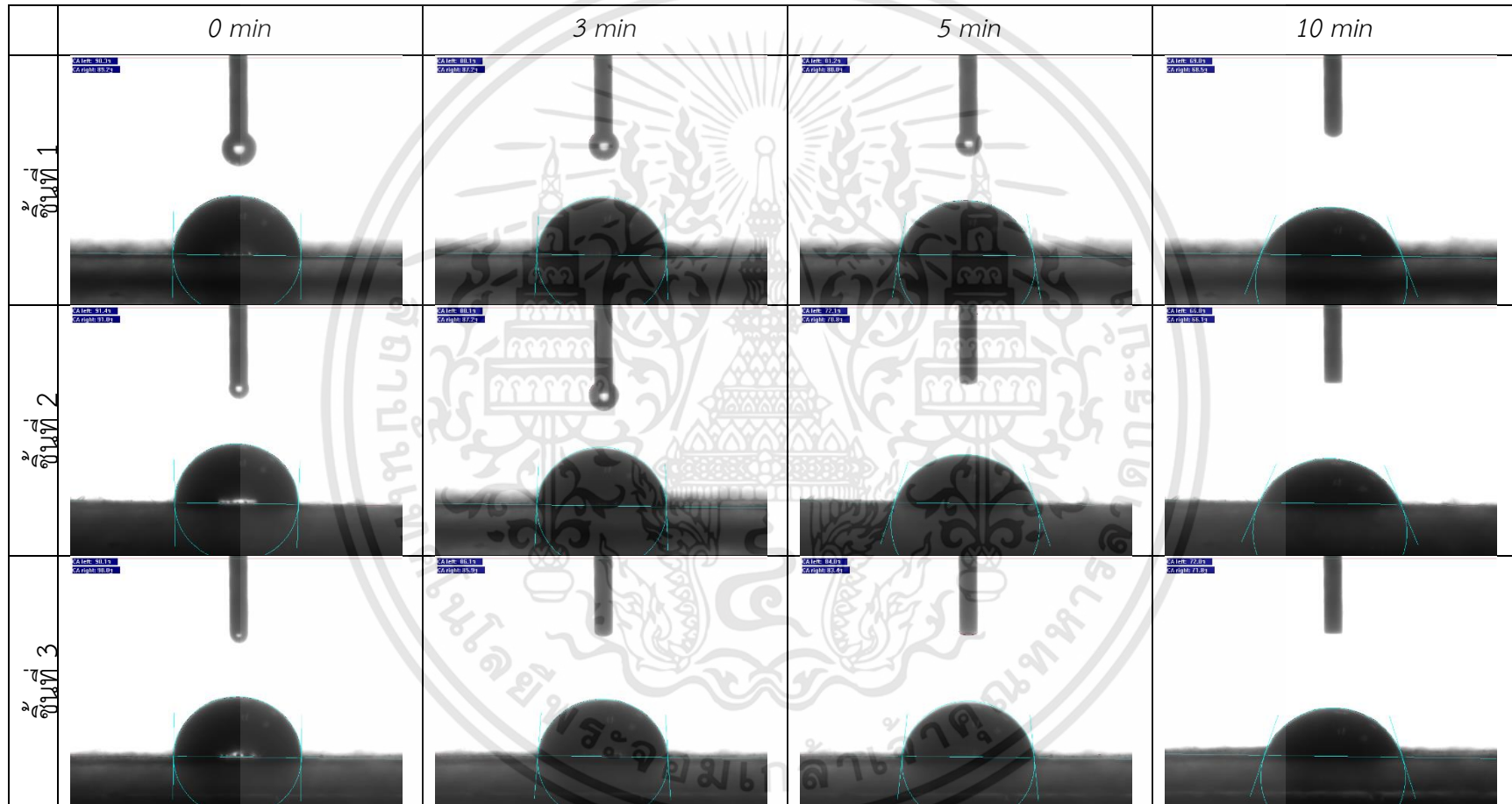
Applied current (μ A)	10	12	15	20	25	
Voltage(mV)	ชั้นที่ 1	4.5	5.5	6.2	7.8	9.4
		3.6	4.4	4.8	4.3	6.1
		3.5	4	4.4	5.5	6.8
	ชั้นที่ 2	3	4.1	4.7	5.5	7.2
		4.2	4.4	6.2	7	7.1
		3.7	4.6	5.7	5.8	7.8
	ชั้นที่ 3	4.8	7.4	8	8.8	9.6
		4.6	4.6	7	8.5	12
		3	5.2	6.2	6.4	7.7
เฉลี่ย	3.877778	4.911111	5.911111	6.622222	8.188889	
sd	0.675977	1.050529	1.163448	1.51804	1.831287	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

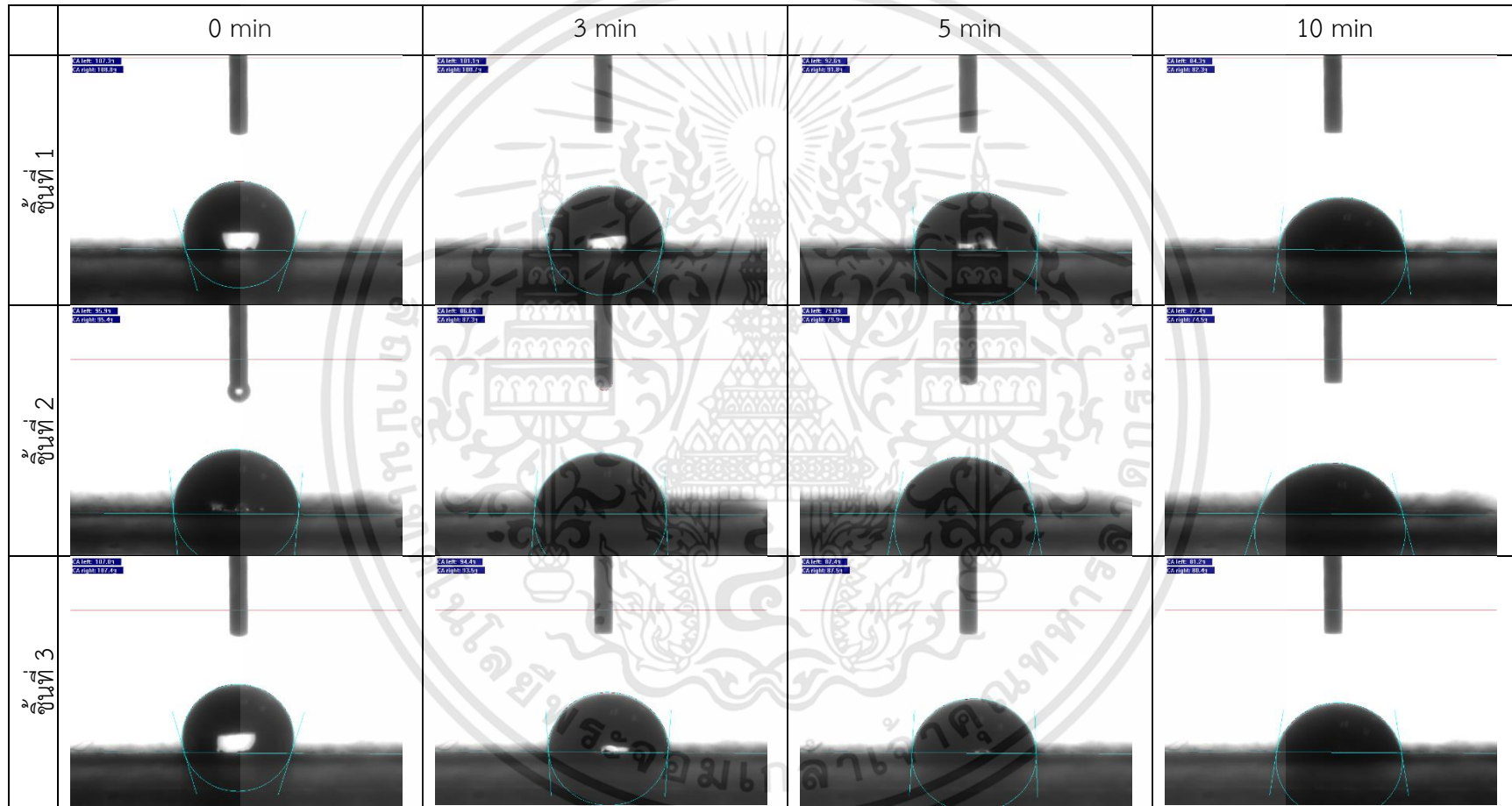
ภาคผนวก ง
การทดสอบมุมสัมผัส



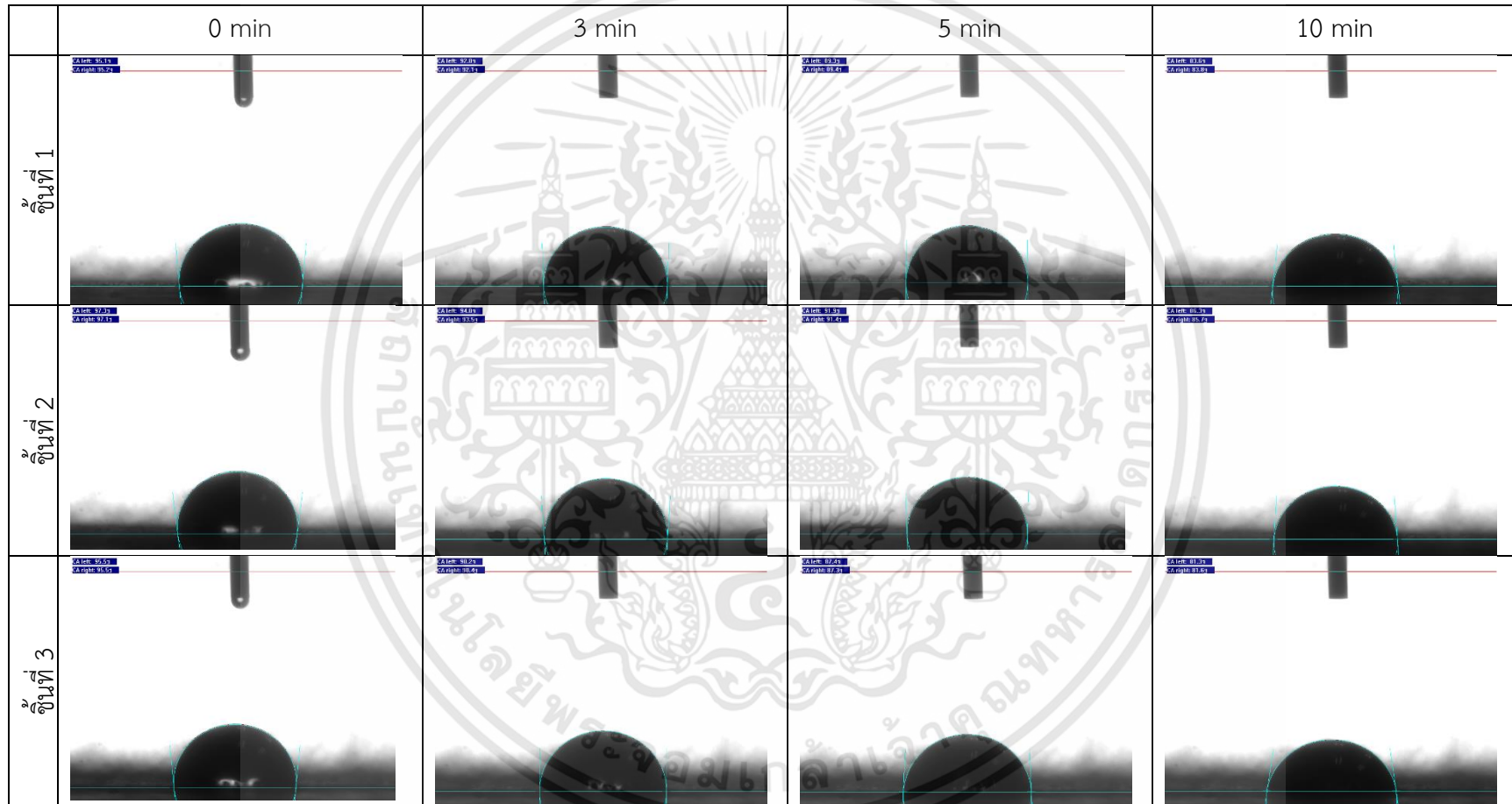
รูปที่ ง 1 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G8 จากชิ้นงาน 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ ง 2 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G7.5R0.5 จากชิ้นงาน 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 3 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G7.0R1.0 จากชิ้นงาน 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ ๔ ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G6.0R2.0 จากชิ้นงาน 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ

สูตร	ชั้นที่	มุมสัมผัส (องศา)			
		0min	3min	5min	10min
T1L1G8	1	83.2	81.0	78.6	72.9
	2	88.1	82.7	80.1	70.0
	3	89.5	87.4	85.3	74.7
	เฉลี่ย	86.9	83.7	81.3	72.5
	sd	3.3	3.3	3.5	2.4
T1L1G7.5R0.5	1	90.3	88.1	81.2	69.1
	2	91.4	73.9	72.1	66.8
	3	90.1	86.1	84.0	72.0
	เฉลี่ย	90.6	82.7	79.1	69.3
	sd	0.7	7.7	6.2	2.6
T1L1G7.0R1.0	1	107.3	101.1	92.6	84.3
	2	95.9	86.6	79.8	72.4
	3	107.0	94.4	87.4	81.2
	เฉลี่ย	103.4	94.0	86.6	78.3
	sd	6.5	7.2	6.4	6.2
T1L1G6.0R2.0	1	95.1	92.00	89.3	83.6
	2	97.3	94.0	91.9	86.3
	3	95.5	90.2	87.4	81.3
	เฉลี่ย	96.0	92.1	89.5	83.7
	sd	1.2	1.9	2.3	2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล
วัน เดือน ปีเกิด	28 เมษายน 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	2/492 หมู่ที่ 1 ถนนสุขุมวิท ตำบลบางเมืองใหม่ อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา เคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.03 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2562 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา เทคโนโลยีพอลิเมอร์ เกรดเฉลี่ย 3.50 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. ธนวรรณ ภัทรสัตยากร, ภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล และอานนท์ ช่างโชติ. 2558. “การปรับปรุงดินสอพองด้วย PVA/กัมอาระบิค/แป้งดัดแปร สำหรับวัสดุรองพื้นในงานสีฝุ่น.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2. Wisetraksakun, P. and Monvisade, P. 2018. “PREPARATION OF CONDUCTIVE INKS FROM EPOXIDIZED SOYBEAN OIL AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER CONTAINING CONDUCTIVE CARBONS.” The proceeding of The 8 th International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (ITICHe 2018). Pattaya: 179-184.

การเตรียมหมึกนำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์และ
ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์โดยใช้อนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้า

PREPARATION OF CONDUCTIVE INKS FROM
EPOXIDIZED SOYBEAN OIL AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER
CONTAINING CONDUCTIVE CARBONS



ภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล
PINYALAK WISETRAKSAKUN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF CONDUCTIVE INKS FROM
EPOXIDIZED SOYBEAN OIL AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER
CONTAINING CONDUCTIVE CARBONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-SC-M-014-024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมหมึกนำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์และยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์โดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนนำไฟฟ้า
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล
รหัสประจำตัว	59605035
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าฐานน้ำมันถั่วเหลือง (Soy-based conductive inks) จากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidised soybean oil, ESO) เป็นฐานหมึกพิมพ์ ผสมร่วมกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidised natural rubber, ENR) โดยใช้ไขมันลินสีดและน้ำมันทังซึ่งเป็นน้ำมันชักแห้ง (Drying oil) เป็นสารช่วยในการเชื่อมโยง และใช้คาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive carbons) เป็นสารให้สีและให้สมบัติการนำไฟฟ้า โดยเลือกใช้แกรไฟต์ (Graphite) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide : RGO) โดยที่ RGO เตรียมได้จากการนำแกรไฟต์มาสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีโดยปรับปรุงจากวิธีของฮัมเมอร์ (Hummers' method) RGO ที่เตรียมได้นำไปตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy เพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง และใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) เพื่อหาโครงสร้างผลึก และศึกษาขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital microscope) โดยน้ำมันผสมสูตรที่ใช้อัตราส่วนน้ำมันทัง : น้ำมันลินสีด เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก (สูตร T1L1) เป็นสูตรที่เหมาะสมต่อการนำมาเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์ และได้ศึกษาสมบัติลักษณะพื้นผิว และค่าสภาพความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance : R_s) ของหมึกพิมพ์ที่มีปริมาณแกรไฟต์ที่แตกต่างกันในแต่ละสูตร พบว่าสูตร T1L1G8 เป็นสูตรที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ และมีค่า R_s ต่ำที่สุด จึงนำมาปรับสูตรโดยการแทนที่แกรไฟต์บางส่วนด้วยการเติม RGO ลงไปในหมึกพิมพ์ พบว่าค่า R_s มีค่าต่ำลงเมื่อมีอัตราส่วนในการใช้ RGO เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์ และจำลองการใช้งานด้วยการประกอบวงจรไฟฟ้า โดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร

คำสำคัญ : คาร์บอนนำไฟฟ้า น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ น้ำมันลินสีด น้ำมันทัง ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Preparation of Conductive Inks from Epoxidized Soybean Oil and Epoxidized Natural Rubber Containing Conductive Carbons
Student Name	Miss Pinyalak Wisetraksakun
Student ID	59605035
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade

Abstract

This study aimed to prepare the soy-based conductive inks from the recipe including epoxidized soybean oil (ESO) and epoxidized natural rubber (ENR). Drying oils (linseed oil and tung oil) were used to enhance film forming of the ink, and conductive carbons e.g. graphite and reduced graphene oxide (RGO) were used as colorant and conductive particles. RGO was synthesized by chemical reaction of graphite which modified from Hummers method. The received RGO was analyzed by FTIR Spectroscopy to identify its functional groups on the structure. The lattices were explained by XRD pattern and the particle sizes were measured by digital optical microscope. From the results, T1L1 was the most suitable mixed oil recipe and was selected to prepare the conductive ink. The conductive patterns were studied on sheet resistance (R_s) and surface. It was found that T1L1G8 was the lowest R_s and smooth surface, thus, this formula was selected to modify by partially replacement of graphite by RGO. The results showed that the sheet resistance decreased when the higher content of RGO was applied. The simple model of circuit including LED and the prepared conductive printing sheet was set up to confirm the electrical conductivity.

Keywords : Conductive carbon, Epoxidized soybean oil, Linseed oil, Tung oil, Epoxidized natural rubber, Conductive ink

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และข้อชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนอบรมให้มีการทำงานอย่างมีความเป็นระเบียบรอบคอบ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือและตรวจทานการดำเนินงานวิจัยนี้ ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากกับงานวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และอนุเคราะห์ในการใช้ชุดเครื่องทดสอบ 4-point probe

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ครอบครัวที่มอบโอกาสที่ดีในการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนพี่และน้อง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัยนี้ พร้อมทั้งให้กำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษา และให้ทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนในการเสนอผลงานทางวิชาการ

สุดท้ายนี้ประโยชน์และความรู้อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแต่ ครอบครัว ผู้มีพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน และบุคคลที่มีส่วนสนับสนุนอีกมากมายที่ยังมิได้กล่าวถึง ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง หากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า (Conductive inks).....	4
2.2 คาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive carbons).....	4
2.2.1 แกรไฟต์ และ แกรฟีน.....	6
2.2.2 การสังเคราะห์แกรฟีน.....	7
2.3 น้ำมันธรรมชาติ (Natural oils).....	10
2.3.1 น้ำมันลินสีด (Linseed oil).....	11
2.3.2 น้ำมันทัง (Tung oil).....	13
2.3.3 น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oil, ESO).....	14
2.4 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR).....	16
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติอีพอกไซด์.....	16
2.4.2 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์.....	17
2.4.3 การประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์.....	17
2.5 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยวิธีเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe method).....	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 สารเคมี.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	25
3.3 การเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO).....	26
3.4 การเตรียมสารละลายยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธด์.....	26
3.5 การเตรียมสูตรน้ำมันผสม.....	27
3.6 การเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์.....	27
3.7 การเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์ร่วมกับ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์.....	27
3.8 วิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	28
3.8.1 ชิ้นงานสำหรับศึกษาการแห้งผิว.....	28
3.8.2 ชิ้นงานสำหรับศึกษาพื้นผิว, สมบัติการนำไฟฟ้า และความต้านทานน้ำ ของหมึกพิมพ์.....	29
3.9 การตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า.....	29
3.9.1 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).....	29
3.9.2 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD).....	29
3.9.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา.....	30
3.10 การทดสอบสมบัติของน้ำมันผสม: การแห้งผิวของน้ำมันผสม.....	30
3.11 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	30
3.11.1 การแห้งผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์.....	30
3.11.2 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าภายหลังการฉายรังสี UV.....	30
3.11.3 สมบัติทางไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	30
3.11.4 ความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	31
3.11.5 การจำลองการประกอบวงจรโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เป็นส่วนประกอบของวงจร.....	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	33
4.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า.....	33
4.2 ผลของน้ำมันชักแห้งต่อการแห้งของสูตรน้ำมันผสม.....	37
4.3 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ศึกษาเวลาในการแห้งผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	40
4.3.2 ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์ที่ถูกทำให้แห้ง.....	42
4.3.3 ปริมาณเกรไฟต์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า.....	44
4.4 ผลของการใช้รีดิวซ์เกรฟีนออกไซด์.....	46
4.4.1 ปริมาณรีดิวซ์เกรฟีนออกไซด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์.....	46
4.4.2 ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้เกรไฟต์ร่วมกับ รีดิวซ์เกรฟีนออกไซด์.....	48
4.4.3 ศึกษาความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์ที่แห้งแล้ว.....	50
4.5 การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เป็นส่วนประกอบของวงจร.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	65
ภาคผนวก ค.....	67
ภาคผนวก ง.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของน้ำมันลิตส์ด.....	12
2.2 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันลิตส์ด.....	12
2.3 สมบัติบางประการของน้ำมันทั้ง.....	14
2.4 ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้ง.....	14
2.5 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันถั่วเหลือง.....	15
2.6 สมบัติเด่น และ การใช้งานทางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์.....	17
3.1 สมบัติของน้ำมันถั่วเหลืองอิพอกซีไดซ์.....	24
3.2 สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์.....	24
3.3 สัดส่วนของสารละลาย ENR, น้ำมันทั้ง และ น้ำมันลิตส์ด ในสูตรน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ.....	27
3.4 สัดส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ ในสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	28
4.1 ระดับการแห้งที่ผิวของชิ้นงานน้ำมันผสมเมื่อผ่านการฉาย UV ที่เวลาต่าง ๆ	40
4.2 ระดับการแห้งที่ผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเมื่อผ่านการฉาย UV ที่เวลาต่าง ๆ	41
4.3 ค่าสภาพต้านทาน (R) และสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Rs) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์.....	45
4.4 ค่าสภาพต้านทาน (R) และสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Rs) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ร่วมกับรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์.....	48
4.5 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ.....	51
4.6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 3, 5 และ 10 นาที.....	52
ค 1 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G6 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	67
ค 2 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G8 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	67
ค 3 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G7.5R0.5 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	68
ค 4 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G7.0R1.0 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	68
ค 5 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G6.0R2.0 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานต่างกัน.....	69
ง 1 ค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การไฮบริไดซ์ของคาร์บอน.....	5
2.2 อัญรูปของคาร์บอน.....	5
2.3 โครงสร้างของแกรไฟต์.....	6
2.4 อัญรูปต่าง ๆ ที่มีอัญรูปพื้นฐานจากแกรไฟน์ โดยเมื่อแผ่นแกรไฟน์ถูกห่อ, ม้วน และซ้อนกัน ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของฟูลเลอร์, ท่อนาโนคาร์บอน และแกรไฟต์ ตามลำดับ.....	7
2.5 การสังเคราะห์แกรไฟน์ด้วยวิธี Micromechanical cleavage.....	7
2.6 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรไฟน์.....	8
2.7 วิธีการสังเคราะห์แกรไฟน์จากแกรไฟต์.....	9
2.8 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์.....	10
2.9 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันลินสีด (ก) กรดปาล์มมิติก, (ข) กรดไมริสติก, (ค) กรดโอเลอิก, (ง) กรดลิโนเลอิก และ (จ) กรดลิโนเลนิก.....	13
2.10 โครงสร้างของกรดแอลฟาอีลีโอสเตอริก.....	14
2.11 โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 100 เปอร์เซนต์..	15
2.12 ปฏิกริยาอีพอกซิเดชันบนพันธะคู่ของน้ำมันถั่วเหลือง.....	15
2.13 กระบวนการผลิตยางธรรมชาติอีพอกไซด์.....	17
2.14 การวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.....	18
2.15 แบบจำลองภาพตัดขวางของกระแสไฟฟ้าที่แทรกเข้าไปใน ก) ชิ้นงานหนา และ ข) ชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง.....	19
3.1 แบบพิมพ์แผ่นใสที่มีช่องว่างขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร.....	29
3.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน (I) กับความต่างศักย์ (V)...	31
3.3 แบบจำลองการต่อวงจร.....	32
4.1 FTIR สเปกตรัมของแกรไฟต์, แกรไฟน์ออกไซด์ และรีดิคซ์แกรไฟน์ออกไซด์.....	34
4.2 แบบจำลองการสังเคราะห์ XGO และ RGO.....	35
4.3 XRD pattern แกรไฟต์ และ RGO.....	35
4.4 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาค ก) แกรไฟต์ และ ข) รีดิคซ์แกรไฟน์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า.....	36
4.5 แบบจำลองการเกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่ง allylic บนโครงสร้างของโครงสร้าง ก) ESO, ข) น้ำมันทั้ง, ค) น้ำมันลินสีด และ ง) ENR.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงแบบอนุโมลติสระ ระหว่าง ESO, ENR, น้ำมันทั้ง และน้ำมันลินสีด เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง ก) -C-C-, ข) -C-O-O-C- และ ค) -C-O-C-	38
4.7 ระดับการแห้งที่ผิวของน้ำมันผสม.....	39
4.8 ระดับการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า.....	41
4.9 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่กำลังขยาย 60 เท่า ก) – จ) และที่กำลังขยาย 500 เท่า ฉ) –ญ) ของสูตร T1L1, T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8.....	43
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (V) ของสูตร ก) T1L1G6 และ ข) T1L1G8.....	45
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (V) ของสูตร ก) T1L1G7.5R0.5 ข) T1L1G7.0R1.0 และ ค) T1L1G6.0R2.0.....	47
4.12 กราฟแห่งเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Rs) ของหมึกพิมพ์สูตรต่าง ๆ.....	48
4.13 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกนำไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่กำลังขยาย 60 เท่า ก) – ค) และที่กำลังขยาย 500 เท่า ง) –ฉ) ของสูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0.....	49
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสกับเวลาของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตร T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0.....	51
4.15 ตัวอย่างการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยใช้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร และใช้ถ่านไฟฉาย 9V.....	53
ก 1 รูปถ่ายอนุภาคแกรไฟต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 500 เท่า.....	63
ก 2 รูปถ่ายอนุภาคครีติวซ์แกรไฟท์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 500 เท่า...	64
ข 1 ชิ้นงานน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบการแห้งที่ผิว เมื่อได้รับรังสี UV ที่เวลาแตกต่างกัน.....	65
ข 2 ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบการแห้งที่ผิว เมื่อได้รับรังสี UV ที่เวลาแตกต่างกัน.....	66
ง 1 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G8 จากชิ้นงาน 3 ชิ้น ที่เวลาต่าง ๆ.....	70
ง 2 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G7.5R0.5 จากชิ้นงาน 3 ชิ้น ที่เวลาต่าง ๆ.....	71
ง 3 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G7.0R1.0 จากชิ้นงาน 3 ชิ้น ที่เวลาต่าง ๆ.....	72
ง 4 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G6.0R2.0 จากชิ้นงาน 3 ชิ้น ที่เวลาต่าง ๆ.....	73

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	ความหมาย
ESO	Epoxidized soybean oil
ENR	Epoxidized natural rubber
XGO	Exfoliated graphene oxide
RGO	Reduced graphene oxide
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
XRD	X-Ray Diffraction



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

หมึกนำไฟฟ้า (Conductive ink) ถือเป็นความก้าวหน้าในการพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็น การรวมการพิมพ์แบบดั้งเดิม (เช่น การพิมพ์สกรีน, กราเวียร์, เฟลทโซ, ออฟเซต, และอิงค์เจท) [1] ร่วมกับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การประยุกต์ใช้งานของหมึกนำไฟฟ้า เช่น ใช้สำหรับสร้าง วงจรไฟฟ้า, การพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์บนพื้นผิวที่มีความยืดหยุ่น, อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และ อุปกรณ์ส่งสัญญาณโดยระบบสัมผัส [1] หมึกนำไฟฟ้าที่จำหน่ายในท้องตลาดนั้นมักอยู่ในฐานของตัว ทำละลาย โดยอาศัยการระเหยของตัวทำละลายเพื่อให้หมึกแห้งได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีข้อเสีย คือ มีกลิ่น เหม็น, ก่อให้เกิดอันตรายต่อตัวผู้ใช้ และเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีหมึกนำไฟฟ้าฐานน้ำ ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวกลางเพื่อลดการใช้ตัวทำละลาย แต่พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม เช่น หมึกพิมพ์จากพอลิอะคริลิกในรูปอิมัลชัน [2] และน้ำอาจระเหยได้ง่าย ทำให้เนื้อหมึกแห้งตัวก่อน การใช้งาน

ส่วนประกอบที่สำคัญของหมึกนำไฟฟ้าคืออนุภาคที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี เช่น เงิน, ทอง, ทองแดง, และ อะลูมิเนียม [3] แต่วัสดุเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูง และ โลหะบางชนิดอาจเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าต่ำลง เช่น การเกิด Al_2O_3 ที่ผิวของอะลูมิเนียม [1] ในปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้วัสดุอื่นที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และยังเป็น การลดต้นทุนในการผลิต หนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการใช้คาร์บอนนำไฟฟ้า เช่น แกรไฟต์ และแกรฟีน เป็นต้น [4]

แกรไฟต์ และแกรฟีนมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่โดดเด่น เนื่องจากโครงสร้างมีอิเล็กตรอนอิสระที่ สามารถเคลื่อนที่ผ่านทั่วทั้งอนุภาค [5] ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของวัสดุ โดยในงานด้านหมึกพิมพ์มี การศึกษาการใช้อนุภาคของเขม่าดำ/แกรไฟต์ [6] และแกรไฟต์/แกรฟีน [4] ซึ่งพบว่าการใช้อนุภาค แกรฟีนและแกรไฟต์ส่งผลทำให้การนำไฟฟ้าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อนุภาคแกรฟีนในหมึก พิมพ์ ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า และเหมาะกับการพิมพ์ลงบนวัสดุที่ต้องการความยืดหยุ่น หรือ งานที่อาจเกิดการโค้งงอได้ [7]

ส่วนประกอบที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งในหมึก คือ สารที่ช่วยยึดอนุภาคนำไฟฟ้าให้มีความต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งควรเกิดเป็นฟิล์มที่แห้งหลังจากที่ทาลงบนวัสดุที่ใช้พิมพ์แล้ว นอกเหนือจากหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย และฐานน้ำ ซึ่งมีการใช้ตัวทำละลาย และผลิตภัณฑ์จาก ปิโตรเลียม ยังมีการวิจัยหมึกพิมพ์ที่ผลิตโดยใช้น้ำมันถั่วเหลือง [35] ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน เนื่องจากการลดการใช้ตัวทำละลายที่เป็นอันตราย โดยในท้องตลาด นั้นมีเพียงหมึกพิมพ์จากน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้ในการพิมพ์หนังสือพิมพ์ และหมึกออฟเซตเท่านั้น ดังนั้น การเลือกน้ำมันถั่วเหลืองเพื่อใช้สำหรับหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมหมึกนำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ (ESO) ร่วมกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (ENR) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ และ ไม่มีความเป็นพิษ และใช้ออนุภาคแกรไฟต์ และ/หรือ แกรฟีน เป็นสารที่ก่อให้เกิดการนำไฟฟ้า โดยอาศัยการเชื่อมโยงของ ESO และ ENR ในการทำให้เกิดฟิล์มของหมึกพิมพ์ เสริมด้วยการใช้น้ำมันชกแห้ง ได้แก่ น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง เพื่อช่วยให้การแห้งของหมึกมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้า, การยึดติดระหว่างอนุภาคกับฟิล์มที่สร้างขึ้น, และการยึดติดระหว่างหมึกกับวัสดุที่ใช้พิมพ์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าฐานน้ำมันถั่วเหลืองที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ และ/หรือ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์
- 2) เพื่อศึกษาการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์, ลักษณะของพื้นผิว และความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มหมึกพิมพ์
- 3) เพื่อพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าที่มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และลดปริมาณการปลดปล่อยสารที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์
- 2) ตรวจสอบวิเคราะห์เอกลักษณ์แกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์
- 3) ศึกษาระยะเวลาในการแห้งที่ผิวของสูตรน้ำมันผสม เพื่อเลือกใช้เป็นสูตรตั้งต้นในการใช้เตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า
- 4) เตรียมหมึกนำไฟฟ้าจาก ESO ร่วมกับ ENR และน้ำมันชกแห้ง โดยใช้แกรไฟต์ และ/หรือ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นอนุภาคนำไฟฟ้า โดยศึกษาผลของสัดส่วนขององค์ประกอบ ดังนี้
 1. สัดส่วนของน้ำมันชกแห้ง
 2. สัดส่วนของอนุภาคนำไฟฟ้าต่อน้ำมันผสม
 3. สัดส่วนของแกรไฟต์ และ/หรือ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์
- 5) ตรวจสอบสมบัติของหมึกนำไฟฟ้า
 1. ระยะเวลาการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า
 2. ลักษณะพื้นผิว และสภาพความต้านทานน้ำของฟิล์มหมึกพิมพ์
 3. สมบัติการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมหมึกนำไฟฟ้าฐานน้ำมันถั่วเหลือง ที่มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า (Conductive inks)

อิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์ (Printed Electronic, PE) เป็นการสร้างวงจร และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยการพิมพ์หมึก หรือพอลิเมอร์ โดยวิธีการพิมพ์มีความคล้ายกับการพิมพ์แบบดั้งเดิม เช่น การพิมพ์แบบออฟเซต (Offset), การพิมพ์อิงค์เจต (inkjet) และการพิมพ์สกรีน (Screen printing) เป็นต้น ลงไปบนวัสดุต่าง ๆ [1] แต่มีความต่าง คือ หมึกพิมพ์ที่ใช้เป็นหมึกที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า เมื่อถูกพิมพ์ลงบนวัสดุแล้วต้องผ่านกระบวนการฉายแสงหรือได้รับความร้อน [4] ผลิตภัณฑ์ไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์ลงบนวัสดุที่มีความยืดหยุ่นได้ และมีราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า [8, 9]

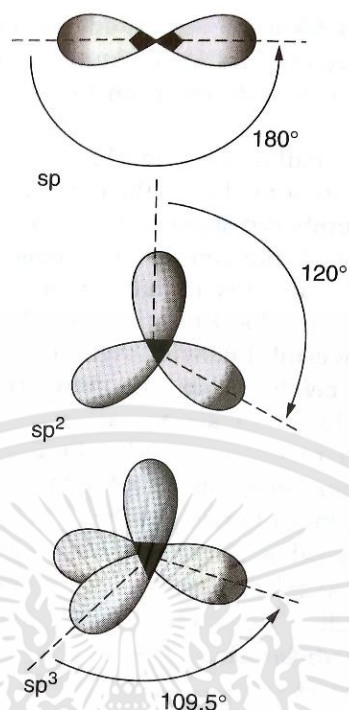
การพัฒนาหมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีผลต่อการพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์ [10] เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์มีการใช้งานเฉพาะทาง เช่น แผงวงจร (Electrical circuit), การตรวจวิเคราะห์โรค (Health diagnostics), หน้าจอแสดงผลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic display), ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage), และใช้ในงานด้านความมั่นคงทางอาหาร (Food security) [11]

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นความก้าวหน้าของเทคโนโลยีหมึกพิมพ์ วัสดุที่ใช้พิมพ์มีสมบัติในการนำไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วมักมีการเติมอนุภาค หรือวัสดุนำไฟฟ้าลงไปเป็นส่วนประกอบของหมึก นิยมใช้อนุภาคโลหะ เช่น เงิน (Silver), ทองแดง (Copper), นิกเกิล (Nickel), และอะลูมิเนียม (Aluminium) เป็นต้น เงินเป็นตัวเลือกแรกที้นำมาใช้ เนื่องจากมีการนำไฟฟ้าสูง และมีประสิทธิภาพดี แต่ด้วยเงินมีราคาแพงจึงมีการใช้วัสดุอื่นที่มีราคาต่ำกว่า ได้แก่ ทองแดง, อะลูมิเนียม และสังกะสี แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของวัสดุเหล่านี้คือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ที่อุณหภูมิห้อง เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ของออกไซด์ของโลหะที่ผิวของอนุภาค [12] ทำให้มีการนำไฟฟ้าที่ลดลง และเป็นข้อจำกัดของการใช้อนุภาคเหล่านี้ในสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า [4] ต่อมามีการใช้คาร์บอนซึ่งมีสมบัติในการนำไฟฟ้าแทนอนุภาคโลหะเพื่อแก้ไขปัญหา

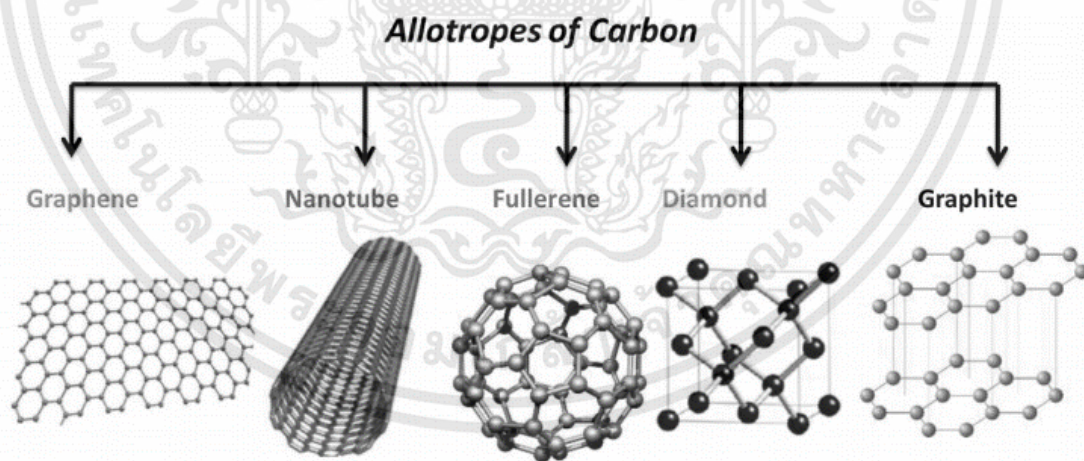
2.2 คาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive carbons) [13, 14]

อะตอมคาร์บอนเป็นธาตุลำดับที่ 6 ในตารางธาตุ และ เป็นธาตุลำดับแรกของหมู่ IV ประกอบไปด้วย 6 อิเล็กตรอน ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 ที่สามารถเกิดไฮบริไดเซชัน (Hybridizations) ได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ sp , sp^2 , และ sp^3 แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยอัญรูป (Allotrope) พื้นฐานของผลึกคาร์บอน ได้แก่ แกรฟีน (Graphene), แกรไฟต์ (Graphite), ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube), ฟูลเลอร์เร็น (Fullerene), และเพชร (Diamond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การไฮบริไดซ์ของคาร์บอน [14]

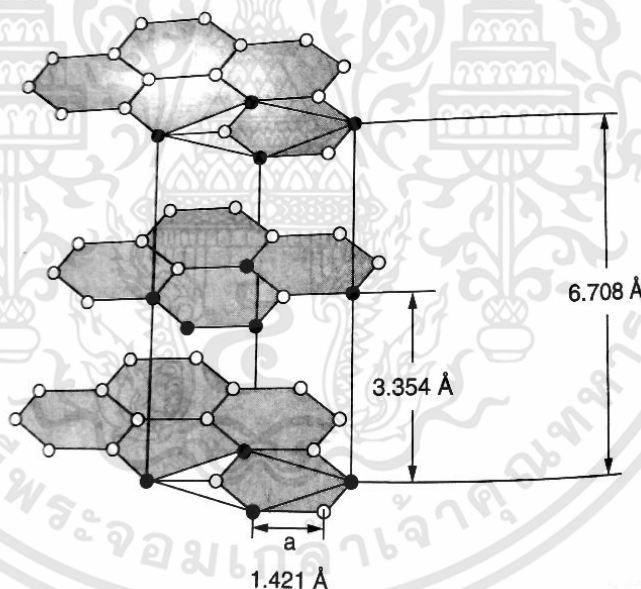


รูปที่ 2.2 อัญรูปของคาร์บอน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 แกรไฟต์ และ แกรฟีน [5, 13-14, 16]

แกรไฟต์ (Graphite) มีโครงสร้างที่เป็นโครงตาข่าย 3 มิติที่เกิดจากอะตอม โดยแต่ละอะตอมคาร์บอนเกิดไฮบริดไชน์แบบ sp^2 กับ คาร์บอน 3 อะตอมข้างเคียง ด้วยพันธะโควาเลนต์ เกิดเป็นชั้น (Graphene layer) ที่มีความแข็งแรง ซึ่งมีรูปร่าง 6 เหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง ส่วนอิเล็กตรอนที่เหลืออีก 1 อิเล็กตรอนในออร์บิทัล p อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบซึ่งไม่ถูกไฮบริดไชน์ เกิดการซ้อนเหลื่อมกับออร์บิทัลของคาร์บอนอะตอมถัดไปทำให้เกิดอันตรกิริยาต่อกัน เกิดออร์บิทัลโมเลกุลชนิดไพ (pi-bond) หรือ ออร์บิทัลโมเลกุลไม่ประจำที่ (Delocalized molecular orbitals) ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัลเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หรือ อิเล็กตรอนไม่ประจำที่ (Delocalized electron) การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปมาระหว่างอะตอม คล้ายกับพันธะโลหะ ทำให้แกรไฟต์สามารถนำไฟฟ้าได้บนระนาบ (x-y direction) โดยแต่ละระนาบถูกยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals forces) ในแกน z ซึ่งไม่แข็งแรง สามารถแยกแต่ละระนาบออกจากกันได้ง่าย เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างระนาบมาก (3.35 Å) โครงสร้างของแกรไฟต์แสดงดังรูปที่ 2.3 และหากทำการแยกระนาบออกจากโครงสร้างเป็นระนาบเดี่ยว ๆ จะเรียกระนาบนั้นว่า แกรฟีน (Graphene)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแกรไฟต์ [14]

แกรฟีน (Graphene) คือ ชั้นของอะตอมคาร์บอนที่เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม อาจกล่าวได้ว่า แกรฟีนเป็นชั้นของระนาบเดี่ยว ๆ ของแกรไฟต์ โดยแกรฟีนมีความหนาเท่ากับ คาร์บอน 1 อะตอม หรือเท่ากับ 0.335 nm ซึ่งเป็นอัตราพื้นฐานของสารประกอบคาร์บอนอื่น คือ หากนำแกรฟีนต่อกันเป็นชั้น ๆ ทำให้เกิดโครงสร้างของแกรไฟต์ แต่ถ้านำมาม้วนเป็นทรงกระบอกจะเกิดเป็นวัสดุที่เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอน และหากนำมาห่อให้เกิดเป็นทรงกลมจะเรียกโครงสร้างที่เกิดขึ้นนี้ว่า ฟูลเลอร์รีน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

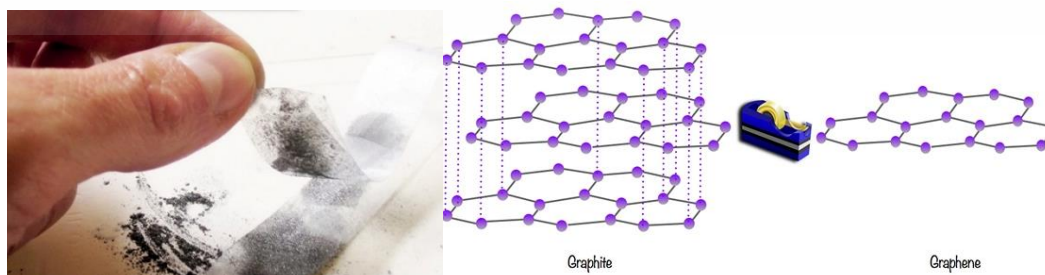
โครงสร้างของแกรฟีนมีอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้แกรฟีนเป็นโมเลกุลที่มีสมบัติการนำไฟฟ้า

2.2.2 การสังเคราะห์แกรฟีน

ในปี ค.ศ. 2004 ศ.ดร. อังเดร ไกม์ (Andre Geim) และ ศ.ดร. คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) สามารถแยกแกรฟีนที่มีความหนาหนึ่งชั้นอะตอมได้สำเร็จ โดยทำการแยกชั้นแกรฟีนจากแกรไฟต์โดยวิธี Micromechanical cleavage (รูปที่ 2.5) หรือการใช้เทปกาวทาบบนแกรไฟต์แล้วลอกออก แล้วทำเช่นนี้ซ้ำ ๆ โดยในแต่ละครั้งแผ่นแกรไฟต์ที่ติดขึ้นมาทับเทปกาวมีความบางลงเรื่อย ๆ จนได้แผ่นที่บางที่สุด ซึ่งผลงานนี้ทำให้ทั้งสองท่านได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2010 [16]



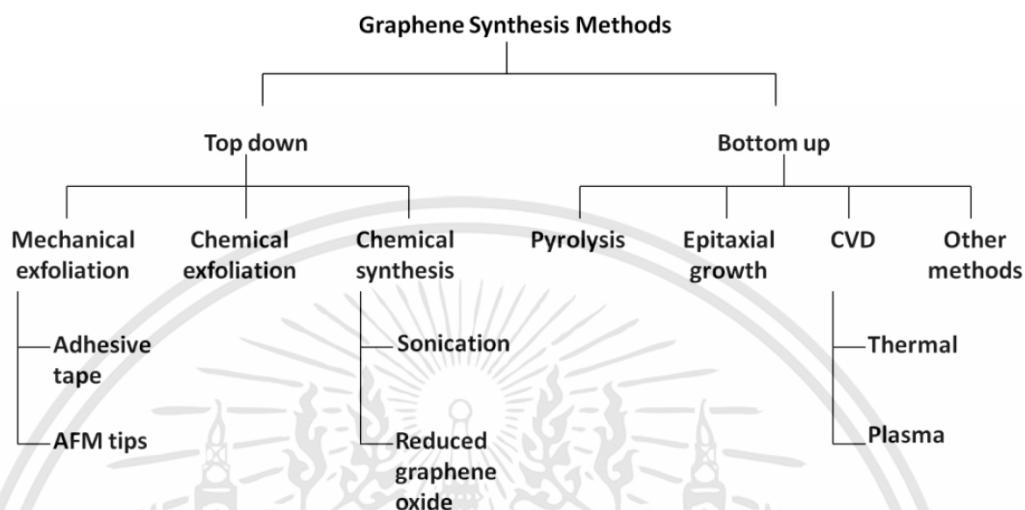
รูปที่ 2.4 อัญรูปต่าง ๆ ที่มีอัญรูปพื้นฐานจากแกรฟีน โดยเมื่อแผ่นแกรฟีนถูกห่อ, ม้วน และซ้อนกัน ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของฟูลเลอรีน, ท่อนาโนคาร์บอน และแกรไฟต์ ตามลำดับ [17]



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธี Micromechanical cleavage [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการสังเคราะห์แกรฟีนสามารถทำได้หลายวิธี โดยแบ่งการสังเคราะห์ออกเป็น 2 วิธีการใหญ่ ๆ คือ การสังเคราะห์จากใหญ่ไปเล็ก หรือบนลงล่าง (Top-down) และการสังเคราะห์จากเล็กไปใหญ่ หรือล่างสู่บน (Bottom-up) [19, 20] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรฟีน [19]

กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างแบ่งเป็นการลอก (Exfoliation) แผ่นแกรฟีนจากโครงสร้างแกรไฟต์ได้โดยตรงทั้งจากการใช้แรงเชิงกล และการใช้วิธีทางเคมีช่วยให้เกิดการลอกชั้นแกรฟีนได้ง่ายขึ้น ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส, การสร้างชั้นเอพิแทกซี, การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยไอระเหยทางเคมี (CVD) เป็นต้น ซึ่งวิธีการกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บนจะเป็นวิธีที่ซับซ้อน ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง แต่ให้แกรฟีนในปริมาณมาก นิยมทำในระดับอุตสาหกรรม ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างสามารถทำได้ง่ายกว่า เหมาะสำหรับการเตรียมในระดับห้องปฏิบัติการและงานวิจัย

1) การหลุดลอกออกด้วยวิธีการเชิงกล (Mechanical exfoliation) [20]

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าแกรไฟต์เกิดจากการซ้อนทับกันของแกรฟีน และยึดแต่ละชั้นอย่างอ่อน ๆ ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งมีพลังงานพันธะระหว่างชั้นแกรฟีน เท่ากับ 2 eV/nm^2 และแรงที่ต้องใช้ในการแยกชั้นแกรฟีนออกจากแกรไฟต์มีค่าประมาณ $300 \text{ nN/}\mu\text{m}^2$ [21] โดยทำการลอกชั้นแกรฟีนด้วยวิธีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเทปกาว หรือการแยกแกรไฟต์โดยใช้ปลายหัวอ่านของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM) [22] และถ่ายโอนชั้นแกรไฟต์บาง ๆ ที่แยกออกมาได้ลงบนตัวรองรับ (Substrate) โดยข้อเสียของวิธีการเชิงกล คือ 1) แกรฟีนที่ได้มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งเพียงพอสำหรับงานวิจัยที่ต้องการใช้แกรฟีนในปริมาณน้อย แต่ไม่เพียงพอสำหรับงานวิจัยที่จำเป็นต้องมีการสร้างอุปกรณ์หรือนำไปใช้ในงานระดับอุตสาหกรรม 2) แกรฟีนที่ได้ไม่ใช่แกรฟีนที่มีจำนวนชั้นเดียว ๆ ทั้งหมด แต่ยังคงมีแกรฟีนที่มีจำนวนชั้นหลายชั้น (แกรไฟต์) ปะปนอยู่

3) โอกาสในการได้แกรฟีนที่มีโครงสร้างคล้ายกันมีอยู่น้อยมาก

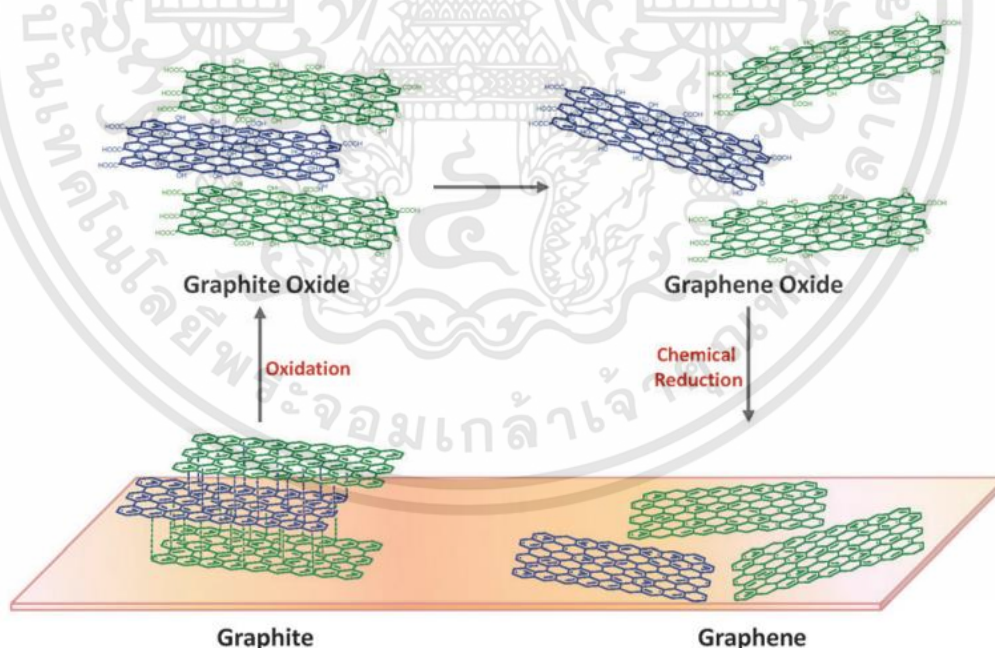
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การหลุดลอกออกด้วยวิธีทางเคมี (Chemical exfoliation) [20]

การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีหลุดลอกออกทางเคมีทำให้ได้แกรฟีนที่อยู่ในรูปของสารละลาย โดยการใส่โลหะอัลคาไลน์เข้าไปแทรกอยู่ (Intercalation) ระหว่างชั้นแกรฟีนของโครงสร้างแกรไฟต์ เพื่อให้เกิดการหลุดลอกของชั้นแกรฟีนออกมา โดยข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ได้แกรฟีนที่ยังไม่เป็นแกรฟีนที่บริสุทธิ์ เนื่องจากยังมีส่วนโครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ปะปนอยู่ และยังมีสารเคมีตกค้างอีกด้วย

3) การสังเคราะห์ทางเคมี (chemical synthesis) [20]

การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีการนี้เป็นที่นิยม เนื่องจากมีกระบวนการที่ค่อนข้างง่าย และไม่ซับซ้อน กระบวนการในวิธีนี้ คือ แกรไฟต์ถูกออกซิไดซ์ด้วยกรดแก่ และออกซิแดนท์ เพื่อให้ได้เป็นแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับแกรไฟต์บริสุทธิ์ จากนั้นทำการอัลตราโซนิก (Sonication) โดยขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อให้แกรไฟต์ออกไซด์แต่ละชั้นหลุดออกเป็นแผ่นแกรฟีนออกไซด์และกระจายอยู่ในตัวทำละลาย หลังจากนั้นจึงทำการรีดิวซ์ให้กลับเป็นแกรฟีน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 การทำอัลตราโซนิกอาจทำให้แกรฟีนที่ได้มีขนาดเล็กลง และอาจเกิดข้อบกพร่องในโครงสร้างผลึกที่ได้ด้วย ซึ่งปกติแล้วแผ่นแกรฟีนขนาดใหญ่และปราศจากความบกพร่องในโครงสร้างของผลึกมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า

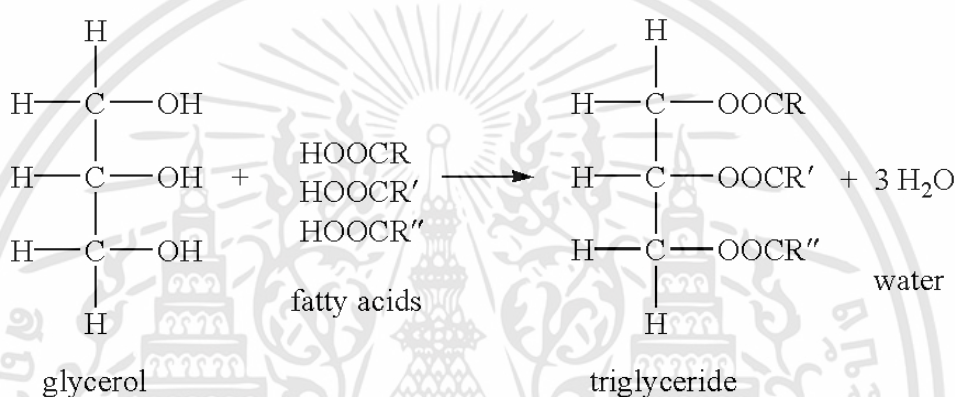


รูปที่ 2.7 วิธีการสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรไฟต์ [23]

2.3 น้ำมันธรรมชาติ (Natural oils) [24]

ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันจากธรรมชาติในการเตรียมวัสดุพอลิเมอร์ทดแทนวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เนื่องด้วยสาเหตุจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และนอกจากนี้ น้ำมันธรรมชาติยังเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นได้ในระยะเวลาสั้น ๆ

น้ำมันธรรมชาติเป็นสารไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มลิพิด (Lipid) มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง มีโครงสร้างทางเคมีเป็นหมู่เอสเทอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) กับกรดไขมัน (Fatty acid) แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยที่หมู่ R, R' และ R'' โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน 13-21 อะตอม



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ [25]

น้ำมันไตรกลีเซอไรด์มีส่วนของกรดไขมันประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ซึ่งกรดไขมันเป็นสารที่มีองค์ประกอบของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ต่อกับสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันส่งผลต่อสมบัติ และการแห้งตัวของน้ำมัน ชนิดของกรดไขมันสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid)

กรดไขมันอิ่มตัวเป็นโครงสร้างที่ไม่มีพันธะคู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ต่อจากหมู่คาร์บอกซิลิก ดังนั้น ไขมันที่มีโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโครงสร้าง มีสมบัติไม่แห้งตัว เช่น กรดไมริสติก (Myristic acid), กรดปาล์มิติก (Palmitic acid), และกรดสเตียริก (stearic acid) เป็นต้น

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid)

กรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นโครงสร้างที่มีพันธะคู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ 1 พันธะขึ้นไป เช่น กรดโอเลอิก (Oleic acid), กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid), และกรดลิโนเลนิก (Linolenic acid) เป็นต้น โดยในกรดไขมันที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 ตำแหน่ง และมีโครงสร้างแบบพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เรียกว่า Conjugated ส่วนโครงสร้างของพันธะคู่ที่อยู่ห่างกัน เรียกว่า Non-conjugated

ความแตกต่างของกรดไขมันแต่ละชนิด ขึ้นกับจำนวน และตำแหน่งของพันธะคู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติที่แตกต่างกันของน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ หากมีพันธะคู่มากทำให้การแห้งตัวของน้ำมันเร็วขึ้น และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมีโครงสร้างที่เป็น Conjugated ช่วยเสริมการแห้งตัวให้เร็วมากยิ่งขึ้น โดยปริมาณพันธะคู่ในโครงสร้าง หรือ ค่าองศาความไม่อิ่มตัวบอกได้จากการวัดค่าไอโอดีน (Iodine value) ซึ่งเป็นการหาปริมาณไอโอดีน (มิลลิกรัม) ที่ทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมัน 100 กรัม ทำให้สามารถแบ่งน้ำมันตามค่าไอโอดีนได้เป็น 3 ชนิด คือ น้ำมันแห้งเร็ว (Drying oils), น้ำมันแห้งช้า (Semi-drying oils), และ น้ำมันไม่แห้ง (Non-drying oils)

1) **น้ำมันแห้งเร็ว หรือ น้ำมันชักแห้ง (Drying oils)** มีค่าไอโอดีนมากกว่า 130 ซึ่งมีการแห้งตัวที่เร็วที่สุด โดยโครงสร้างไม่อิ่มตัวของกรดไขมันสามารถจับกับออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปลี่ยนน้ำมันจากของเหลวเป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง มีสมบัติทนทานสารเคมี และตัวทำละลายกลุ่มที่ละลายน้ำมันได้ และทนต่อการซึมผ่านของความชื้น น้ำมันชนิดนี้มักประกอบด้วยกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 3 พันธะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง เป็นต้น

2) **น้ำมันแห้งช้า (Semi-drying oils)** มีค่าไอโอดีน 90-130 โครงสร้างที่เป็นพันธะคู่ของน้ำมันชนิดนี้สามารถจับกับออกซิเจนในอากาศได้น้อย และเกิดเป็นฟิล์มได้ช้ากว่าน้ำมันแห้งเร็ว มีพันธะคู่ 2 พันธะต่อสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน (Sunflower oil) เป็นต้น

3) **น้ำมันไม่แห้ง (Non-drying oils)** มีค่าไอโอดีนน้อยกว่า 90 น้ำมันชนิดนี้ไม่สามารถแห้งตัวได้ เนื่องจากส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว หรือมีโครงสร้างที่เป็นพันธะคู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนในปริมาณน้อย นิยมใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สำหรับเรซินที่ใช้เป็นสารยึดเกาะในแลกเกอร์ เช่น น้ำมันละหุ่ง (Castor oil) เป็นต้น

น้ำมันธรรมชาติที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์, น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง

2.3.1 น้ำมันลินสีด (Linseed oil)

ลินสีด หรือชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Linum usitatissimum* สามารถใช้ประโยชน์จากลินสีดได้สองประเภท ดังนี้

1) เส้นใยจากลำต้น ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสิ่งทอ (Fabrics) เช่น ผ้าลินิน (Linen), เชือก (Twines), ผ้าใบ (Canvas), และวัสดุกันความร้อน เป็นต้น

2) น้ำมันจากเมล็ด โดยการนำเมล็ดมาผ่านกระบวนการสกัดให้อยู่ในรูปของน้ำมัน ซึ่งเมล็ดลินสีดมีปริมาณน้ำมันประมาณ 35-50 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันลินสีดจัดเป็นประเภทน้ำมันแห้งเร็ว หรือน้ำมันชักแห้ง จึงนำไปใช้เป็นส่วนผสมในสี, น้ำมันชักเงา, น้ำมันเคลือบไม้, หมึกพิมพ์, ผ้าพลาสติก, น้ำมันพอกหนัง, จารบี และสารหล่อลื่น เช่น ผสมกับน้ำมันสน, น้ำมันตะกั่วดำ เป็นต้น

2.3.1.1 การสกัด และ สมบัติของน้ำมันลินสีด

กระบวนการสกัดน้ำมันลินสีด เริ่มจากการตากแห้งเมล็ดลินสีดแล้วเก็บไว้ จากนั้นล้างสิ่งสกปรกแล้วผ่านเข้าไปในเครื่องบดแบบลูกกลิ้ง (Roller mill) เพื่อกะเทาะเปลือกออก เมล็ดที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกถูกเคลื่อนไปผ่านไอน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปบีบในเครื่องบีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า เอกซ์เพลเลอร์ (Expellers) จะได้น้ำมันออกมาประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกากนำไปให้ความร้อน แล้วบีบน้ำมันออกที่ความดันสูง ๆ หรือสกัดด้วยตัวทำละลายต่อได้ สำหรับกากที่เหลือมีน้ำมันเหลืออยู่ ประมาณ 1-6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำมันที่ได้จากการสกัดมีความขุ่น ไม้ใส เนื่องจากมีเมล็ดปนอยู่ ดังนั้น จึงควรทำการกรองสิ่งปนเปื้อนก่อนนำไปใช้งาน

น้ำมันลินสีดมีส่วนประกอบของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ซึ่งปริมาณขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ และฤดูกาลในการเจริญเติบโต น้ำมันที่ได้มีลักษณะใสจนถึงมีสีเหลืองอ่อน มีจุดเดือดประมาณ 343 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวที่ -24 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำมันลินสีดเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว ชนิดกรดแอลฟาโอเลอิก ในปริมาณมาก ทำให้เกิดการเหม็นหืน (Rancidity) ได้ง่าย และมีอายุการเก็บรักษาสั้น (Short Shelf-Life) ทั้งการผลิตในเชิงการค้ามีน้อยเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ น้ำมันลินสีดจึงถูกใช้เพื่อการบริโภคน้อย โดยทั่วไป น้ำมันลินสีดดิบถ้าทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจะแข็งภายใน 4 วัน ถ้าสภาวะต่าง ๆ ไม่เหมาะสม อาจถึง 10 วัน ถ้าจะให้แข็งเร็วขึ้นต้องเติมสารเร่งแข็ง สมบัติบางประการของน้ำมันลินสีดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของน้ำมันลินสีด

สมบัติทางเคมี และทางกายภาพ	น้ำมันลินสีดดิบ	น้ำมันลินสีดที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์
ค่าไอโอดีน (g/น้ำมัน 100 g)	170	170
ค่าของกรด (mg KOH /น้ำมัน 1 g)	3.5	0.5
ค่าสะพอนิฟิเคชัน (mg ค่าง/น้ำมัน 1 g)	18	190
ร้อยละของสารที่สะพอนิฟายไม่ได้	1.25	1.25
ความถ่วงจำเพาะ, 25 องศาเซลเซียส	0.9201	0.9184
ดัชนีหักเห, 25 องศาเซลเซียส	1.4780	1.4784

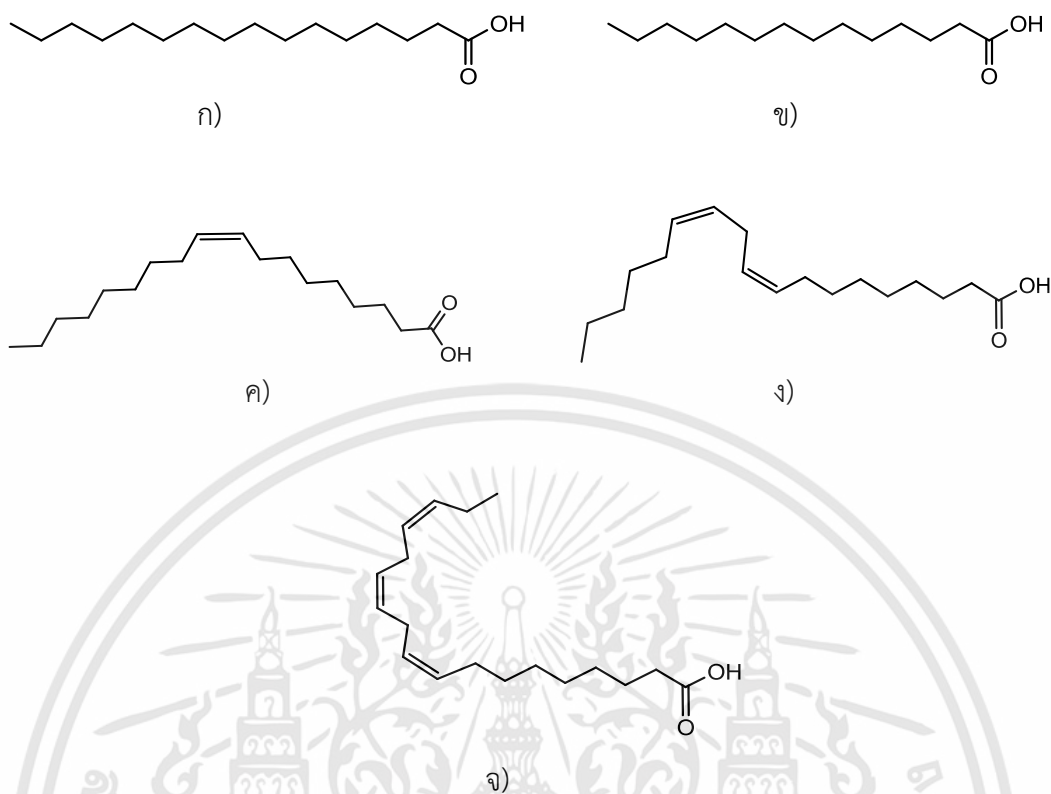
ตารางที่ 2.2 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันลินสีด

ชนิดกรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
กรดปาล์มมิติก	6.72
กรดไมริสติก	2.73
กรดโอเลอิก	21.63
กรดลิโนเลอิก	13.29
กรดลิโนเลนิก	56.61

จากตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันลินสีด โดยมี

โครงสร้างทางเคมีแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันลินสีด (ก) กรดปาล์มมิติก, (ข) กรดไมริสติก, (ค) กรดโอเลอิก, (ง) กรดลิโนเลอิก และ (จ) กรดลิโนเลนิก

2.3.2 น้ำมันทัง (Tung oil)

น้ำมันทังสกัดได้จากต้นทัง ซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Vernicia montana Lour.* อยู่ในวงศ์ *Eupobiaceae* เป็นพืชที่มีในประเทศจีน น้ำมันทังจัดเป็นน้ำมันแห้งเร็วเช่นเดียวกับน้ำมันลินสีด มีสีเหลือง และมีกลิ่นเฉพาะตัว นิยมใช้เป็นส่วนประกอบในการทำสี หรือในหมึกดำ (Indian ink) และยังใช้สำหรับทาไม้ให้มีความมันวาว (Lustrous finish on wood)

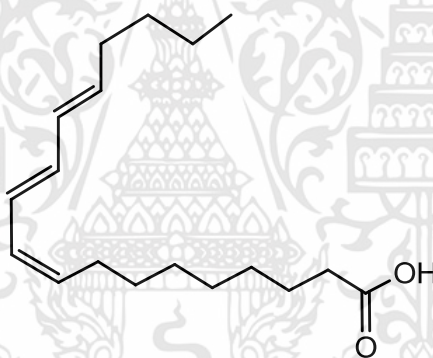
น้ำมันทังมีสมบัติแห้งเร็ว และเหนียว นอกจากนี้ยังมีสมบัติพิเศษ คือ สามารถเกิดการพอลิเมอไรเซชันได้โดยตรงจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดอีน (Diene synthesis) เนื่องจากกรด α -Eleostearic ที่มีอยู่ในปริมาณสูง จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีซึ่งเป็นผลจากระบบคอนจูเกตในสายโซ่ น้ำมันทังมีการเชื่อมโยงที่เร็วกว่าน้ำมันลินสีด และมีความแข็งแรงมากกว่า เมื่อให้ความร้อนแก่ น้ำมันทังที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเป็นเจล (Gelation) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ น้ำมันจะเปลี่ยนเป็นสีดำ หรือหากอุณหภูมิสูงมาก ๆ อาจเกิดการติดไฟขึ้นได้ โดยทั่วไป น้ำมันทังดิบมีสมบัติดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของน้ำมันทั้ง

สมบัติ	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ 20 °C	0.9375
ความชื้น และสิ่งเจือปน (%)	0.01
จุดวาบไฟ (Flash point) (°C)	288.90
อุณหภูมิติดไฟโดยอัตโนมัติ (Autoignition temperature) (°C)	457

2.3.2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันทั้ง

น้ำมันทั้งมีโครงสร้างเป็นไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นโครงสร้างเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมันหลายชนิด โดยชนิดกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้ง แสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งกรดแอลฟาอีลีโอสเตียริก (α -Eleostearic) (รูปที่ 2.10) เป็นกรดไขมันที่มีมากที่สุดถึง 82.0 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกรดแอลฟาอีลีโอสเตียริก

ตารางที่ 2.4 ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้ง

กรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
กรดแอลฟาอีลีโอสเตียริก	82.0
กรดลิโนเลอิก	8.5
กรดปาล์มมิติก	5.5
กรดโอเลอิก	4.0

2.3.3 น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (Epoxydized soybean oil, ESO)

น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) เป็นหนึ่งในน้ำมันธรรมชาติที่มีราคาไม่แพง และหาได้ง่าย นอกจากใช้สำหรับปรุงอาหารแล้วยังใช้น้ำมันถั่วเหลืองในอุตสาหกรรมอื่นอีก เช่น ในอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวมีการใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นตัวทำละลายในหมึกพิมพ์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันถั่วเหลืองจัดอยู่ในประเภทน้ำมันแห้งช้า ซึ่งเป็นน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ชนิดหนึ่งประกอบไปด้วยกรดไขมันทั้งชนิดอิ่มตัว และชนิดไม่อิ่มตัวหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.5

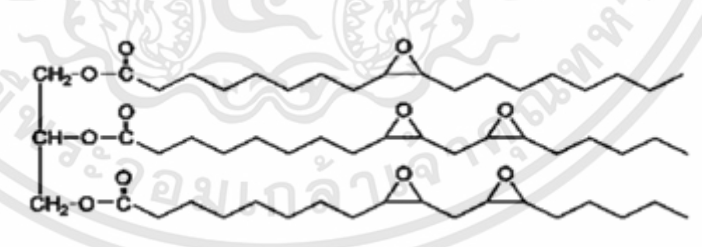
ตารางที่ 2.5 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันถั่วเหลือง

กรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
กรดปาล์มมิติก	11
กรดโอเลอิก	26
กรดลิโนเลอิก	52
กรดลิโนเลนิก	7
กรดสเตียริก	4

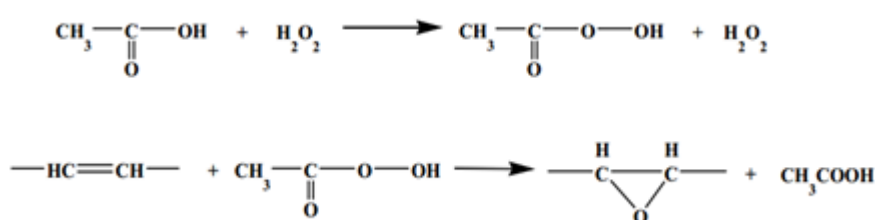
2.3.3.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์

น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ (ESO) คือ น้ำมันถั่วเหลืองที่ถูกดัดแปร โดยผ่านกระบวนการอีพอกซิเดชันที่ตำแหน่งพันธะคู่ เกิดเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาน้ำมันถั่วเหลืองกับกรดแอซิดิกเปอร์ออกไซด์โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.12

น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ถ้ามีการเชื่อมโยงโครงสร้างเป็นตาข่ายสามมิติ แต่ยังมีข้อด้อยด้านความแข็งแรง อาจปรับปรุงสมบัติโดยการผสมกับอีพอกซีเรซิน หรือการทำโคพอลิเมอร์เซชันกับสไตรีน และการทำเป็นวัสดุคอมโพสิทก์สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทานต่อการใช้งานมากขึ้น



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันบนพันธะคู่ของน้ำมันถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์

- ลักษณะเป็นของเหลวเหนียว สีเหลืองอ่อน
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.993
- มีค่าจุดเยือกแข็ง 0 องศาเซลเซียส
- จุดวาบไฟ 315 องศาเซลเซียส

2.3.3.2 การประยุกต์ใช้งาน

น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ถูกใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่ใส่ลงในกระบวนการผลิตพลาสติก เพื่อให้มีสมบัติเปลี่ยนไป คือ มีความอ่อนนุ่ม, ยืดหยุ่นสูง, ทนต่อสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และทนต่ออุณหภูมิ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตเป็นหมึกพิมพ์ถั่วเหลืองได้

หมึกพิมพ์น้ำมันถั่วเหลือง (Soy ink)

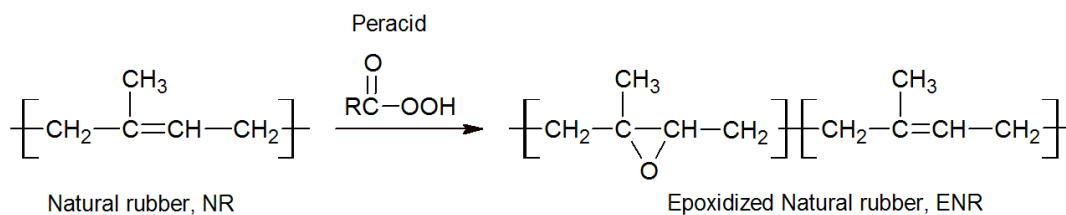
หมึกพิมพ์น้ำมันถั่วเหลืองมีลักษณะคล้ายกับหมึกพิมพ์ที่มีขายทั่วไป แต่แตกต่างกันที่ส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิตหมึกพิมพ์ โดยนำน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งเป็นน้ำมันที่สกัดจากธรรมชาติ และไม่มีสารพิษมาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันที่สกัดจากธรรมชาติ และไม่มีสารพิษ น้ำมันถั่วเหลืองที่อยู่ในหมึกพิมพ์ช่วยให้สารสีทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยหมึกพิมพ์นี้มีการใช้สารระเหยในปริมาณน้อย จึงช่วยลดมลพิษทางอากาศ และลดการสัมผัสสารพิษของผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังช่วยให้การนำกระดาษกลับมาใช้ใหม่ทำได้ง่ายขึ้นในกระบวนการแยกหมึกออกจากสิ่งพิมพ์

หมึกพิมพ์ถั่วเหลืองนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากอัตราส่วนผสมของสารให้สี รวมถึงสารเติมแต่งอื่น ๆ ยังคงมีปริมาณใกล้เคียงกับอัตราส่วนในหมึกฐานน้ำมันปิโตรเลียม แต่หมึกพิมพ์ฐานน้ำมันถั่วเหลืองมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า

2.4 ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR) [26]

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ เป็นยางที่นำยางธรรมชาติมาปรับโครงสร้างโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) เป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ที่บริเวณพันธะคู่ ผ่านกระบวนการอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) ในโครงสร้างแบบสุ่ม ยางประเภทนี้มีลักษณะเป็นยางสีน้ำตาลเข้มกว่ายางธรรมชาติปกติ ระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์ เช่น ENR10, ENR25 และ ENR50 คือ ยางธรรมชาติที่มีหมู่อีพอกไซด์ร้อยละ 10, 25 และ 50 โดยโมล ตามลำดับ ตัวอย่างปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตยางธรรมชาติอีพอกไซด์ [27]

2.4.2 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างมีผลทำให้มีสมบัติบางประการที่เปลี่ยนไปจากยางธรรมชาติ เช่น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, ความถ่วงจำเพาะ และความมีขี้ เป็นต้น

- T_g ของ ENR25 และ ENR50 เท่ากับ -45°C และ -20°C ตามลำดับ
- ความถ่วงจำเพาะของ ENR25 และ ENR50 มีค่า 0.970 และ 1.030 ตามลำดับ
- ความมีขี้สูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์
- ความทนน้ำมัน (Oil resistance) เพิ่มขึ้น เมื่อมีหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้น
- การซึมผ่านของแก๊ส (Gas permeability) ต่ำลง เมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์มากขึ้น

2.4.3 การประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นยางที่ถูกปรับปรุงให้มีขี้เพิ่มมากขึ้น สามารถทนต่อน้ำมัน และตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ได้ดีขึ้น ทนต่อโอโซน และมีการซึมผ่านของอากาศต่ำ จึงมีประโยชน์ในการใช้งานประเภทสารยึดติด, รองเท้า, สี, ยางรถยนต์, พื้นยาง, และผลิตพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) กับพอลิเมอร์ที่มีขี้ เช่น PVC

ตารางที่ 2.6 สมบัติเด่น และ การใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์[28]

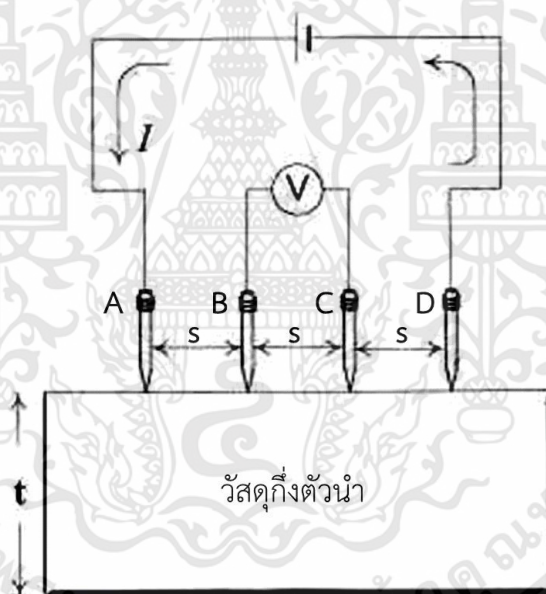
สมบัติเด่น	การใช้งาน	เกรดของยาง
ทนทานต่อน้ำมัน	ท่อ, ข้อต่อ, และสายยาง	ENR25, ENR50
การซึมผ่านของอากาศต่ำ	แบลตเตอร์, ยางใน, เคลือบภายในท่อ	ENR25
เสริมประสิทธิภาพได้ด้วยซิลิกา	ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่ไม่ต้องการให้เป็นสีดำ	ENR25
มีความต้านทานต่อการหมุนต่ำ	ดอกยางรถยนต์, พื้นยาง, พื้นรองเท้ายาง	ENR25, ENR50
การหน่วง	ป้องกันการสั่นของเครื่อง และ ใช้งานกับเครื่องกลทางวิศวกรรม	ENR25, ENR50
การติดประสาน	กาว, เคลือบสายพานพีวีซี	ENR25, ENR50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยวิธีเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe method)

สภาพความต้านทานแสดงถึงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญเมื่อต้องการนำวัสดุกึ่งตัวนำมาสรางเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า โดยการวัดความต้านทานให้มีประสิทธิภาพนั้นต้องทำการควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้คงที่ แต่ในทางปฏิบัติแล้วการวัดความต้านทานให้มีความแม่นยำสูงทำได้ยาก เนื่องจากผลจากสภาพแวดล้อม และสภาวะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ, เครื่องมือวัด และการติดตั้งเครื่องมือวัด

วิธีเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe method) เป็นวิธีมาตรฐานในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) มีหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นการวัดความต้านทานด้วยเข็มขนาดเล็กลง 4 จุด โดยระยะห่างระหว่างเข็มทั้ง 4 มีระยะ s เท่า ๆ กัน ในขั้นตอนการทดสอบหัวเข็มทั้ง 4 สัมผัสบนพื้นผิวของวัสดุ และทำการให้กระแสไฟฟ้า (I) คงที่ที่เข็มด้านนอกสุด (เข็ม A) กระแสไฟฟ้าจะไหลจากเข็ม A ผ่านวัสดุไปยังเข็ม D เกิดเป็นแรงดันตกคร่อม จึงทำการวัดค่าแรงดัน (V) ที่เข็มด้านใน (เข็ม B และ C) [50]



รูปที่ 2.14 การวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด

ความต้านทาน (Resistance : R) ที่ได้จากเข็มคู่ด้านในให้ค่าแตกต่างกัน [51] ดังแสดงในสมการที่ 2.1

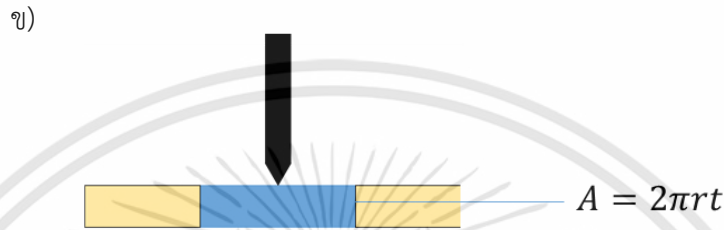
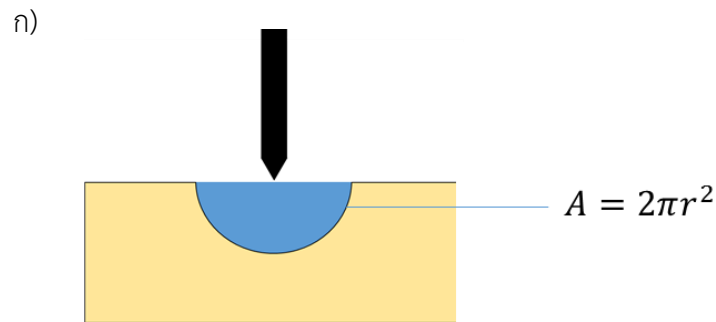
$$\Delta R = \rho \left(\frac{dx}{A} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ แทน สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)

x แทน ระยะของหัวเข็มที่จ่ายกระแสไฟฟ้าถึงหัวเข็มที่ตรวจวัด

A แทน พื้นที่ผิวที่กระแสไฟฟ้าสามารถแทรกไปในชิ้นงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12.5 แบบจำลองภาพตัดขวางของกระแสไฟฟ้าที่แทรกเข้าไปใน ก) ชิ้นงานหนา และ ข) ชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง

กรณีของชิ้นงานหนา (Bulk sample) [51, 52] ความหนาของชิ้นงาน (t) มากกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม (s) มากๆ หรือ $t \gg s$ รูปแบบของกระแสไฟฟ้าแทรกผ่านเข้าไปในชิ้นงานมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม (รูปที่ 12.5 ก)) พื้นที่ผิวที่กระแสไฟฟ้าแทรกเข้าไปในชิ้นงานหนามีค่า $A = 2\pi r^2$ ดังนั้น

$$\Delta R = \rho \left(\frac{dx}{2\pi r^2} \right) \quad (2.2)$$

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi r^2} = \left[\frac{\rho}{2\pi} \left(-\frac{1}{x} \right) \right]_{x_1}^{x_2} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{1}{2s} \frac{\rho}{2\pi} \quad (2.4)$$

เนื่องจากเกิดการทับซ้อนกันของกระแสที่หัวเข็มด้านนอกทั้งสอง $R = V/2I$ ดังนั้น

$$\rho = 2\pi s \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ s แทน ระยะห่างของหัวเข็ม (Probe spacing)

V แทน ค่าต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)

I แทน กระแสไฟฟ้า (Electric current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นแผ่นบาง (Thin sheet) [51, 52] ความหนาของชิ้นงานน้อยกว่าระยะห่างระหว่างเข็มวัดมาก ๆ หรือ $T \ll s$ รูปแบบของการแทรกผ่านชิ้นงานมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (รูปที่ 12.5 ข)) พื้นที่ผิวที่กระแสไฟฟ้าแทรกเข้าไปในชิ้นงานที่เป็นแผ่นบางมีค่า $A = 2\pi xt$ ดังนั้น

$$\Delta R = \rho \left(\frac{dx}{2\pi xt} \right) \quad (2.6)$$

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi xt} \quad (2.7)$$

$$R = \int_s^{2s} \frac{\rho}{2\pi t} \frac{dx}{x} \quad (2.8)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi t} \ln x \Big|_s^{2s} \quad (2.9)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi t} \ln 2 \quad (2.10)$$

หรือ

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.11)$$

ความต้านทานของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง เป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นกับระยะห่างของเข็มวัดสามารถรายงานค่าด้วยค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance : R_s)

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (2.12)$$

ดังนั้น

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.13)$$

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Secor และคณะ [7] ได้พัฒนาการเตรียมหมึกพิมพ์สำหรับการพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แกรฟีน (Graphene) ที่ผ่านกระบวนการลอกชั้นแกรฟีน (Liquid-phase exfoliation) โดยใช้ไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose, NC) เพื่อช่วยในการแยกชั้นแกรฟีน ผ่านกระบวนการจนได้ผง Graphene/NC และเตรียมหมึกพิมพ์ได้โดยนำผง Graphene/NC กระจายในสารละลาย และใช้การโซนิเคชัน (Sonication) ช่วยให้มีการกระจายตัวที่ดี เมื่อนำไปทำการทดสอบ พบว่ามีการนำไฟฟ้าประมาณ 40,000 S/m ซึ่งถือว่ามีค่าสูงสำหรับวัสดุคาร์บอน และฟิล์มหมึกพิมพ์ที่ได้ยังทนต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเชิงกล และสภาพแวดล้อมได้ดี ยืนยันจากการทดสอบการโค้งงอ (Cyclic bending), การทดสอบด้วยสก๊อตเทป (Scotch tape testing), การทดสอบ Damp heat aging

Patil [4] ศึกษาการเตรียมหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้อะคริลิกเรซิน (Acrylic resin) และได้เติมโปรตีนถั่วเหลือง เพื่อลดสัดส่วนการใช้พอลิเมอร์จากปิโตรเลียม พร้อมศึกษาผลของสัดส่วนแกรฟีนต่อแกรไฟต์ พบว่าสูตรหมึกที่มีการใช้แกรฟีนในสัดส่วนที่มากกว่า มีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า และการเติมโปรตีนถั่วเหลืองทำให้มีความต้านทานการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

Hummers และคณะ [29] เตรียมแกรฟีนออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในสภาวะกรด และมีโซเดียมไนเตรตช่วยในการเกิดปฏิกิริยา เกิดเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ และทำการโซนิเคชันเพื่อให้เกิดการลอกของชั้นแกรไฟต์ออกไซด์ เพื่อให้ได้เป็นแกรฟีนออกไซด์

Chen และคณะ [30] สังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ซึ่งพัฒนาจากวิธีของ Hummers โดยไม่ใช้โซเดียมไนเตรตเพื่อลดการเกิดแก๊สที่เป็นพิษจากขั้นตอนการเตรียม พบว่าแกรฟีนออกไซด์ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากวิธีนี้มีการกระจายตัว, โครงสร้างทางเคมี, ความหนา, รูปร่าง และร้อยละผลผลิตใกล้เคียงกับวิธีของ Hummers แบบดั้งเดิม

Liu และคณะ [31] ศึกษาการใช้ลิกนินช่วยในการลอกชั้นแกรไฟต์ออกจากกัน เพื่อให้ได้แกรฟีนที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งเกิดการลอกหลุดออก และมีความเสถียร เนื่องจากลิกนินสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่ผิวของชั้นแกรฟีน และทำให้แต่ละชั้นของแกรฟีนผลึกออกจากกันซึ่งเป็นผลจากประจุลบของลิกนิน การที่แผ่นแกรฟีนคงตัวอยู่ได้โดยไม่กลับมารวมกันทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี

Yossif และคณะ [32] เตรียมพอลิเมอร์จากน้ำมันพืชสำหรับนำไปใช้เป็นหมึกพิมพ์ โดยเตรียมจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์ และ น้ำมันละหุ่งอีพ็อกไซด์ ผ่านปฏิกิริยาเปิดวงอีพ็อกไซด์ (Ring opening reaction) ด้วยพอลิอีเทอร์เอมีน (Polyether amine) และพอลิพรอพิลีนไกลคอล (Polypropylene glycol) พบว่า พอลิเมอร์ที่เตรียมได้แสดงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงที่ดี และหมึกที่ได้มีเสถียรภาพสูง โดยพอลิเมอร์ที่มีสมบัติดีที่สุดคือ น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์ และน้ำมันละหุ่งอีพ็อกไซด์ ที่ถูกเปิดวงด้วย พอลิอีเทอร์เอมีน

Pawar และคณะ [33] เตรียมอีพ็อกซีเรซินจากธรรมชาติ โดยเตรียมจากน้ำมันฝ้ายอีพ็อกไซด์ (Epoxidized cottonseed oil, ECO) และ น้ำมันสาหร่ายอีพ็อกไซด์ (Epoxidized algae oil, EAO) ซึ่ง ECO และ EAO ทำปฏิกิริยากับกรดซิตริก (Citric acid) (ได้เป็น COCA และ AOCA) และกรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) (ได้เป็น COTA และ AOTA) โดยนำของผสมไปให้อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ได้เป็นของเหลวหนืดจึงนำไปหล่อเป็นฟิล์มบางแล้วอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และทำการ post cure ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายเบส และยังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Karmalm และคณะ [34] ศึกษาการเชื่อมโยงน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ในพีวีซีพลาสติกซอล และพีวีซีที่อยู่ในรูปสารแขวนลอย โดยใช้สัดส่วนน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ 50 phr ต่อพีวีซีแต่ละชนิด และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการอบ 5, 10, 15, 20, และ 30 นาที พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้นในสูตรที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ใช้ สรุปได้ว่าน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์มีผลต่อการเชื่อมโยงที่ทำให้วัสดุแข็งตัวได้

พงศัยุทธ์ จันทอง และคณะ [35] ศึกษาการเตรียมและพัฒนาหมึกพิมพ์สกรีนฐานน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นตัวทำละลายแทนน้ำมันปิโตรเลียมในการผลิตหมึกพิมพ์ พบว่าหมึกพิมพ์ที่ได้ใช้เวลาในการแห้งตัวมากกว่าหมึกพิมพ์เชิงพาณิชย์ จึงเพิ่มการใช้สารเร่งแห้ง ได้แก่ Cobalt naphthenate และ Manganese naphthenate และนอกจากนี้ยังศึกษาชนิดของวารันิซที่ใช้ พบว่า Alkyd resin (BECKOSOL ES-5003-60) ใช้เวลาแห้งตัวน้อยกว่า Alkyd resin (BECKOSOL ES-6501-70-HV) แต่ยังคงใช้เวลาในการแห้งตัวนานกว่าหมึกพิมพ์เชิงพาณิชย์

Oyman และคณะ [36] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันแห้งเร็วที่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต ได้แก่ น้ำมันลินสีด และระบบคอนจูเกต ได้แก่ น้ำมันถั่ว โดย Co(II)-2-ethylhexanoate (Co-EH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยน้ำมัน 2 ชนิดนี้มีกลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่างกัน โดยที่น้ำมันลินสีดซึ่งไม่เป็นระบบคอนจูเกต เกิดการแตกออกของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งของอัลไลลิก ไฮโดรเจนอะตอม และสามารถจับกับออกซิเจนนำไปสู่การเกิด Hydroperoxide ซึ่งสามารถสลายกลายเป็นอนุมูลอิสระของ Alkoxy และ Peroxy โดยทำให้เกิด การเชื่อมโยง และผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยที่น้ำมันทั้งที่มีระบบคอนจูเกตเป็นหลักนั้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเริ่มจากการแตกออกของไฮโดรเจนจาก Monoallylic เมื่อเทียบกับน้ำมันลินสีดแล้วมีการใช้ปริมาณออกซิเจนที่น้อยกว่า ซึ่งทำให้เกิด Hydroperoxide รวมทั้งได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้น้อยมาก แสดงให้เห็นว่าอนุมูลอิสระชอบเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะคู่ที่เป็นระบบคอนจูเกตมากกว่า โดยจะแทนที่ไฮโดรเจนอะตอมของ Monoallylic

ธันย์จิรา บัวนุช และคณะ [37] ศึกษาการเตรียมหมึกพิมพ์เอทชิง (Etching) สำหรับงานพิมพ์ โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์ (ESO) และผสมกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ โดยมีการใช้น้ำมันลินสีด และน้ำมันถั่วช่วยทำให้เกิดเป็นฟิล์มได้โดยเกิดการเชื่อมโยง นอกจากนี้ยังใช้แว็กซ์เพื่อเพิ่มความหนืดให้กับหมึกพิมพ์ และยังทำให้มีการยึดเกาะของเนื้อหมึกพิมพ์ดี พบว่าหมึกพิมพ์สูตร A15W3L1T1CD5(6.5), A15W3L1T1CD8(6.5) และ A15W3TCD8(6.5) มีค่าความเข้มข้นเฉดสี และความหนืดของหมึกพิมพ์เทียบเท่าหมึกพิมพ์เชิงพาณิชย์ และยังมีสมบัติอื่น ๆ ได้แก่ ความสามารถในการถ่ายโอนหมึกพิมพ์ และความคมชัดของลวดลายมีคุณภาพสูง นอกจากนี้ยังไม่มึกลิ่นเหม็น, สามารถชะล้างออกได้ด้วยน้ำยาซักล้างสูตรน้ำ และมีเสถียรภาพของอายุการใช้งานที่นาน แต่ยังมีฤทธิ์ติดของหมึกพิมพ์ต่ำ และใช้เวลาในการแห้งตัวนานกว่าหมึกพิมพ์เชิงพาณิชย์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าฐานน้ำมัน ที่มีองค์ประกอบของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์เป็นฐานหมึก โดยพัฒนาต่อจากงานวิจัยของ ธันย์จิรา บัวนุช และคณะ [37] ซึ่งใช้น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซิไดซ์เป็นองค์ประกอบหลักของหมึกพิมพ์ และยังมีการใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ เพื่อเพิ่มการยึดติดของหมึกพิมพ์ และลดรอยซึมของน้ำมันที่เกิดขึ้น รวมทั้งใช้น้ำมันลินสีด และน้ำมันถั่ว เพื่อช่วยในการแห้งตัวที่ดีของหมึกพิมพ์ โดยงานวิจัยนี้จะใช้สารตัวเติมที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า ได้แก่ แกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ขึ้นจากการปรับขั้นตอนการเตรียมจากงานวิจัยของ J. Chen และคณะ [30] ทำการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของแกรฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ และศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของหมึกพิมพ์ ได้แก่ การแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์, ลักษณะพื้นผิวของหมึกพิมพ์, สภาพความต้านทานน้ำของฟิล์มหมึกพิมพ์ และความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1) น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์ (Epoxidized soybean oil, ESO) : เกรดการค้า VIKOFLEX® Series 7170, บริษัท ศรีเทพไทยเคมี จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์

สมบัติ	VIKOFLEX® Series 7170
ความหนาแน่น (g/ cm ³)	0.993
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	1000
ค่าการหักเหของแสง	1.472
ปริมาณอีพอกไซด์ (%)	7.0

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัท

2) ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) : เกรดการค้า Epoxyprene 25 (ENR25), บริษัท Muang Mai Guthrie PCL จำกัด

ตาราง 3.2 สมบัติของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

สมบัติ	ENR25
เปอร์เซ็นต์ Epoxidation	25±2
Ash content (Max. % Weight)	0.50
Mooney viscosity ML (1' + 4') 100 C (Range Min-Max)	70-100

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัท

- 3) น้ำมันลินสีด (Linseed oil) : บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
- 4) น้ำมันทัง (Tung oil) : บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
- 5) แกรไฟต์ (Graphite) : บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด
- 6) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H₂SO₄) : บริษัท S D Fine-Chem จำกัด
- 7) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO₄) : บริษัท Ajax Finechem จำกัด
- 8) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) : บริษัท CARLO EABA reagents
- 9) น้ำกลั่น
- 10) ทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง (High speed agitator) พร้อมใบพัดกวน : รุ่น RW 20 Digital, IKA Co., Ltd.
- 2) แผ่นกวนให้ความร้อน (Hot plate with stirrer) : รุ่น C-MAC HS 7, IKA Co., Ltd.
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด : รุ่น AX224, บริษัท Sartorius จำกัด
- 4) เครื่องโซนิเคเตอร์ : รุ่น Elmasonic S 30 H, Elma Schmidbauer
- 5) เครื่องกรองสุญญากาศ
- 6) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) : รุ่น UNIVERSAL 320, Hettich
- 7) เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) : รุ่น CoolSafe 110, scientific promotion Co., Ltd.
- 8) หลอดเซลโลเฟน (Dialysis tubing) : MWCO 8000-14000
- 9) เครื่องแก้ว
- 10) ถ้วยโลหะ
- 11) ซ้อนตักสาร
- 12) เกรียงปาดสี
- 13) แม่เหล็กคนสาร
- 14) กระจกกรอง
- 15) อ่างน้ำแข็ง
- 16) แผ่นพลาสติกใส
- 17) กระจกการ์ดโปร
- 18) ถ่านไฟฉาย 9V, Panasonic
- 19) สายไฟพร้อมปากคีบ
- 20) หลอดไฟ LED ขนาดเล็ก
- 21) ตู้รังสีอัลตราไวโอเล็ต
- 22) Fourier transform infrared spectrometer รุ่น IRTracer-100, SHIMADZU
- 23) X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance, Bruker BioSpin AG
- 24) Digital microscope รุ่น Dino-lite Pro 2, ANMO Electronics Corporation
- 25) เข็มวัด Four-point probe รุ่น HMS-3000, ECOPIA
- 26) เครื่องวัดมุมสัมผัส Contact Angle System OCA, Dataphysics

3.3 การเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO)

- 1) เตรียมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 70 มิลลิลิตร เติมน้ำกรดไฟต์ 3.0 กรัม ลงไป และปั่นกวนในอ่างน้ำแข็งจนกรดไฟต์กระจายตัวอยู่ในกรดซัลฟิวริก
- 2) ค่อย ๆ เติม KMnO_4 9.0 กรัม โดยขั้นตอนนี้ต้องควบคุมให้สารมีอุณหภูมิต่ำกว่า 20°C
- 3) ปรับอุณหภูมิของสารโดยเปลี่ยนจากอ่างน้ำแข็งเป็นอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C และปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
- 4) เติมน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร และปั่นกวนที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 15 นาที
- 5) เติมน้ำปราศจากไอออน 500 มิลลิลิตร และค่อย ๆ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30%) 15 มิลลิลิตร
- 6) กรองสารผสม และล้างด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นำของแข็งที่ได้จากการกรองมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 600 มิลลิลิตร เรียกสารในขั้นตอนนี่ว่า
- 7) นำสารที่ได้จากข้อ 6 ไปทำให้บริสุทธิ์โดยการแยกสารผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Dialysis) เป็นเวลา 1 สัปดาห์
- 8) นำสารที่ได้จากข้อ 7 เจือจางให้มีปริมาตร 1.2 ลิตร ปั่นกวนข้ามคืน และโซนิเคชัน 30 นาที เพื่อให้เกิดการลอก (Exfoliation) ของชั้นแกรไฟต์ออกไซด์ เปลี่ยนเป็นแกรฟีนออกไซด์ (XGO)
- 9) นำสารที่ได้จากข้อ 8 ทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ความเร็วรอบ 4000 rpm เป็นเวลา 20 นาที เพื่อแยกแกรไฟต์ที่ไม่ถูกแยกชั้นออก และนำเฉพาะส่วนที่เป็นชั้นของเหลว (XGO) ไปทำปฏิกิริยารีดักชัน
- 10) XGO ที่ได้จากข้อ 9) นำทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยความร้อนโดยดัดแปลงจากวิธีของ Loryuenyong V. [46] ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ได้เป็นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO)
- 11) ทำสารผสมให้แห้งโดยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)

3.4 การเตรียมสารละลายยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (สารละลาย ENR)

- 1) เตรียมน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์ (Epoxidized soybean oil, ESO) 80 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นชั่งยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR) เกรด ENR-25 20 กรัม แล้วใส่ลงใน ESO ที่เตรียมไว้
- 2) ให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งปั่นกวนจนกระทั่งสารทั้งหมดละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ได้สารละลายยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์เข้มข้น 20% w/w ของน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์

3.5 การเตรียมสูตรน้ำมันผสม

- 1) เตรียมองค์ประกอบตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.3
- 2) ทำการผสมสารที่เตรียมได้จากข้อ 1) ด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- 3) เก็บน้ำมันผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของสารละลาย ENR, น้ำมันทั้ง และ น้ำมันลินสีด ในสูตรน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ

ชื่อสูตร	สารละลาย ENR (g)	น้ำมันทั้ง (g)	น้ำมันลินสีด (g)
T1L4	5.0	1.0	4.0
T2L3	5.0	2.0	3.0
T1L1	5.0	2.5	2.5
T3L2	5.0	3.0	2.0
T4L1	5.0	4.0	1.0

กำหนดสัญลักษณ์ ดังนี้

T แทนน้ำมันทั้ง

L แทนน้ำมันลินสีด

ตัวเลข แทนสัดส่วนการใช้ น้ำมันซั๊กแห้ง

3.6 การเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์

- 1) เตรียมองค์ประกอบตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.4 (สูตรที่ 1-5)
- 2) ทำการผสมสารละลาย ENR, น้ำมันทั้ง และน้ำมันลินสีด ด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- 3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) ผสมร่วมกับแกรไฟต์ โดยผสมให้ผงแกรไฟต์กระจายอย่างสม่ำเสมอในน้ำมันผสมด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- 4) เก็บหมึกพิมพ์ที่เตรียมได้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อใช้ในการทดสอบ

3.7 การเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของอนุภาคแกรไฟต์ร่วมกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

- 1) เตรียมองค์ประกอบตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.4 (สูตรที่ 6-8)
 - 2) ทำการผสมสารละลาย ENR, น้ำมันทั้ง และน้ำมันลินสีด ด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบสูง ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) ผสมร่วมกับแกรไฟต์ และ RGO โดยผสมให้ผงแกรไฟต์ และ RGO กระจายอย่างสม่ำเสมอในน้ำมันผสมด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4) หมักพิมพ์ที่เตรียมได้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ ในสูตรหมักพิมพ์นำไฟฟ้า

สูตรที่	ชื่อสูตร	สารละลาย ENR (g)	น้ำมันทั้ง (g)	น้ำมันลินสีด (g)	แกรไฟต์ (g)	RGO (g)
1	T1L1G2	5.0	2.5	2.5	2.0	0
2	T1L1G4	5.0	2.5	2.5	4.0	0
3	T1L1G6	5.0	2.5	2.5	6.0	0
4	T1L1G8	5.0	2.5	2.5	8.0	0
5	T1L1G10	5.0	2.5	2.5	10.0	0
6	T1L1G7.5R0.5	5.0	2.5	2.5	7.5	0.5
7	T1L1G7.0R1.0	5.0	2.5	2.5	7.0	1.0
8	T1L1G6.0R2.0	5.0	2.5	2.5	6.0	2.0

กำหนดสัญลักษณ์ ดังนี้

ให้ GxRy แทนปริมาณคาร์บอนนำไฟฟ้าในหมักพิมพ์
 โดย G แทนแกรไฟต์
 R แทนรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO)
 x แทนสัดส่วนการใช้แกรไฟต์ในหมักพิมพ์
 y แทนสัดส่วนการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในหมักพิมพ์

3.8 วิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

3.8.1 ชิ้นงานสำหรับศึกษาการแห้งผิว

1) ตัดแผ่นใสให้มีช่องว่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 2x2 ตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1 เพื่อใช้เป็นแบบพิมพ์ควบคุมความหนาของหมักพิมพ์บนชิ้นงาน

2) น้ำมันผสมที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.5 นำมาพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใสด้วยเกรียงปาดสี โดยใช้แบบพิมพ์ในข้อ 1) เพื่อนำไปทดสอบในหัวข้อที่ 3.10

3) หมักพิมพ์ที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.6 นำมาพิมพ์ลงบนกระดาษการ์ดโปโร โดยใช้วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

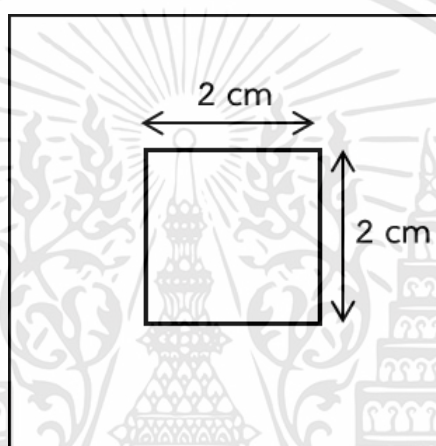
พิมพ์เช่นเดียวกับข้อ 2) เพื่อนำไปทดสอบในหัวข้อที่ 3.11.1

3.8.2 ชิ้นงานสำหรับศึกษาพื้นผิว, สมบัติการนำไฟฟ้า และความต้านทานของหมึกพิมพ์

1) หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.6 และ 3.7 นำมาพิมพ์ลงบนกระดาษการ์ดโปสเตอร์ ด้วยเครื่องปาดสีโดยใช้แบบพิมพ์ที่แสดงตามในรูปที่ 3.1

2) นำชิ้นงานที่พิมพ์หมึกพิมพ์แล้วผ่านการฉายรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้หมึกพิมพ์แห้งตัว

3) ชิ้นงานที่เตรียมได้ นำไปศึกษาพื้นผิว (หัวข้อที่ 3.11.2), สมบัติทางไฟฟ้า (หัวข้อที่ 3.11.3) และความต้านทานน้ำของหมึกนำไฟฟ้า (หัวข้อที่ 3.11.4)



รูปที่ 3.1 แบบพิมพ์แผ่นใสที่มีช่องว่างขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร

3.9 การตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า

3.9.1 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เตรียมสารตัวอย่างของแกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์โดยใช้เทคนิค KBr-pallet มีขั้นตอนดังนี้ ใส่สารตัวอย่างในโถงบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันกับ KBr ในอัตราส่วน sample : KBr เป็น 1:10 แล้วอัดให้เป็นแผ่นบาง ๆ ด้วย Hand press จากนั้นตรวจวัดด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) ในโหมด ATR ตั้งค่าช่วงเลขคลื่น $700-4000\text{ cm}^{-1}$ และจำนวนครั้งในการสแกนเท่ากับ 30

3.9.2 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

นำแกรไฟต์ และแกรไฟต์ที่เป็นผงละเอียดใส่ในช่องใส่สารตัวอย่างของเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้แหล่งกำเนิดเอ็กซ์เรย์ชนิด $\text{Cu K}\alpha$ ในการตรวจวัด โดยใช้ อัตราการกวาดตรวจ (scanning rate) 2 องศาต่อนาที และทำการตรวจวัดในช่วง 5 - 80 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของแกรไฟต์ และรีดิคซ์แกรไฟน์ออกไซด์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบใช้แสง กำลังขยาย 500 เท่า ถ่ายรูป และวัดขนาดอนุภาค

3.10 การทดสอบสมบัติของน้ำมันผสม : การแห้งผิวของน้ำมันผสม

- 1) ชิ้นงานน้ำมันผสมที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.8.1 ข้อ 2) นำไปฉายรังสี UV ที่เวลา 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที
- 2) ชิ้นงานหลังผ่านการฉายรังสี UV ที่เวลาต่าง ๆ นำไปทดสอบการแห้งผิวด้วยวิธีการทดสอบซึ่งปรับจาก มอก. 285 เล่ม 9-2560 โดยทำการเททรายให้ทั่วทั้งชิ้นงานน้ำมันผสม เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที เหยียงชิ้นงาน และใช้แปรงขัดทรายออก (ทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบต้องทำการอบเป็นเวลา 1 วัน และร่อนผ่านตะแกรงเพื่อแยกให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกันก่อนนำมาทำการทดสอบการแห้งผิว)
- 3) สังเกตทรายที่ติดบนชิ้นงาน และบันทึกผล เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแห้งผิวของชิ้นงาน

3.11 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

3.11.1 การแห้งผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์

- 1) ชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.8.1 ข้อ 3) นำไปฉายรังสี UV ที่เวลา 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที
- 2) ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ผ่านการฉายรังสี UV นำไปทดสอบการแห้งผิวด้วยวิธีเดียวกันกับชิ้นงานน้ำมันผสม (หัวข้อที่ 3.10 ข้อ 2) และ 3))

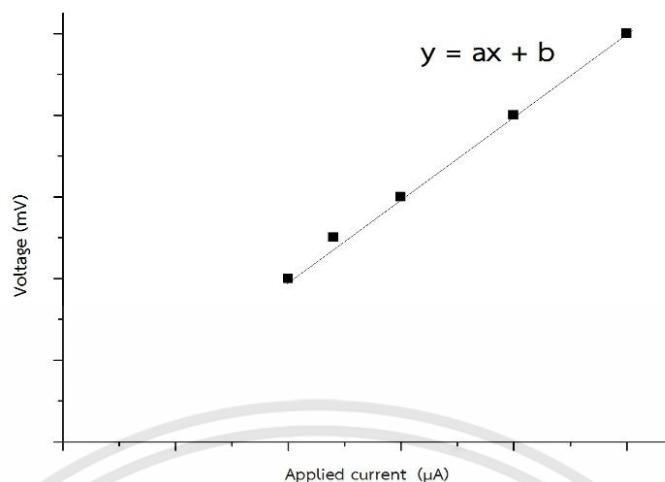
3.11.2 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าภายหลังการฉายรังสี UV

ชิ้นงานที่แห้งแล้วหลังผ่านการฉายรังสี UV นำไปศึกษาพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบใช้แสงที่กำลังขยาย 60 เท่า และ 500 เท่า ทำการบันทึกภาพ

3.11.3 สมบัติทางไฟฟ้าของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

- 1) ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่แห้งแล้วหลังผ่านการฉายรังสี UV นำมาทดสอบด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (4-point probe method) ด้วย Four-point probe รุ่น HMS-3000
- 2) ตรวจสอบวัดค่าความต่างศักย์ (Voltage : V) ที่ได้เมื่อให้กระแสไฟฟ้า (Electric current (I) 10, 12, 15, 20 และ 25 μ A โดยทำการศึกษาชิ้นงาน 3 ชิ้น ชิ้นละ 3 ตำแหน่ง และหาค่าเฉลี่ยของค่าความต่างศักย์
- 3) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน (I) กับค่าความต่างศักย์เฉลี่ย (V) (รูปที่ 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน (I) กับความต่างศักย์ (V)

4) หาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistance : R) จากความชัน (a) ของสมการเส้นตรง $y = ax + b$ ที่ได้จากกราฟ

5) นำสภาพต้านทานไฟฟ้าไปคำนวณค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance : R_s) ตามสมการที่ 2.13

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \quad (2.13)$$

โดยที่ $R = \frac{V}{I}$

6) เปรียบเทียบค่า R_s ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสูตร

3.11.4 ความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ศึกษาความชอบน้ำจากค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของน้ำบนชิ้นงานหมึกพิมพ์ ทดสอบโดยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส หยดน้ำ 10 μl บนชิ้นงาน และถ่ายภาพหยดน้ำ พร้อมวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ที่เวลา 0, 3, 5 และ 10 นาที

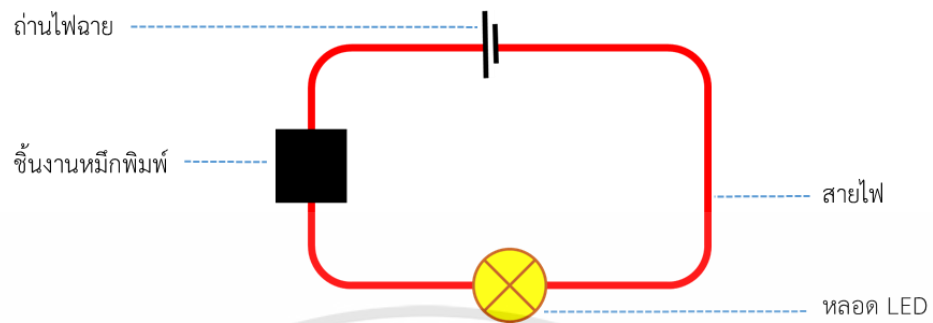
3.11.5 การจำลองการประกอบวงจรโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร

จำลองการใช้งานโดยทำการประกอบวงจรโดยให้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของวงจร โดยรูปแบบการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3.3 และมีส่วนประกอบของวงจร ดังนี้

1. ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$
2. สายไฟ
3. ถ่านไฟฉาย 9V
4. หลอดไฟ LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของหลอดไฟ LED เมื่อต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ครบวงจร



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการต่อวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

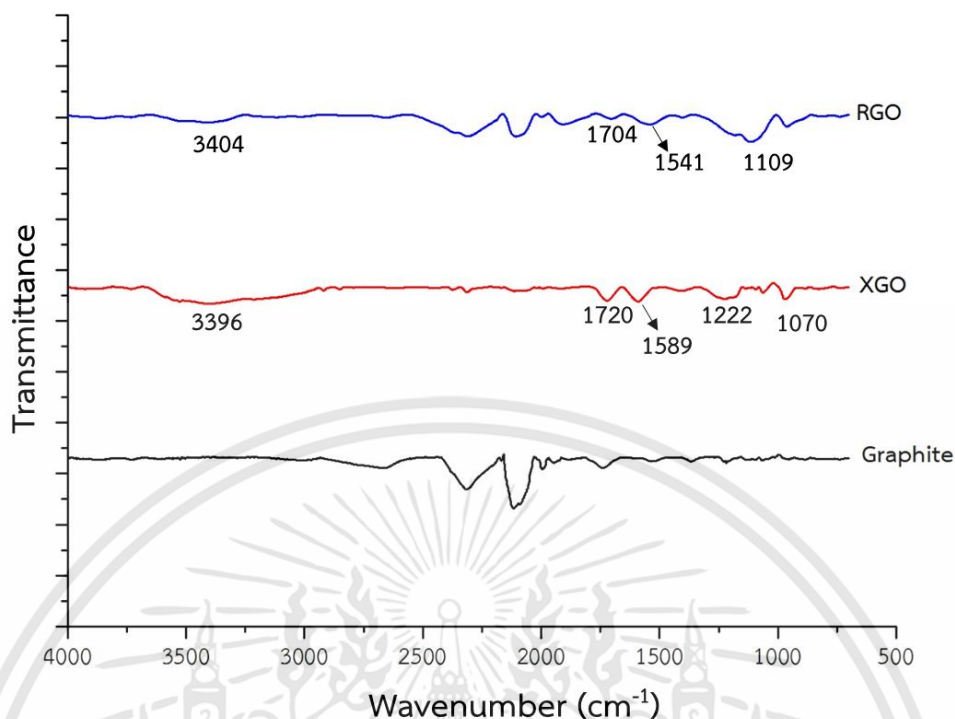
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซีไดซ์ (ESO), ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENR), น้ำมันทัง, น้ำมันลินสีด และคาร์บอนนำไฟฟ้า โดยเริ่มต้นศึกษาสูตรน้ำมันผสมที่ยังไม่ผสมคาร์บอนนำไฟฟ้า โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย ENR : น้ำมันชักแห้ง เป็น 1:1 และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำมันลินสีด : น้ำมันทังเป็น 1:4, 2:3, 1:1, 3:2 และ 4:1 โดยน้ำหนัก แล้วทำการเชื่อมโยงโดยการฉายรังสี UV เพื่อศึกษาระยะเวลาในการแห้งตัวของน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ และ เลือกสูตรน้ำมันผสมจากระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเชื่อมโยงให้เกิดการแห้งตัวเป็นแผ่นฟิล์ม เพื่อนำมาเตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า โดยมีแกรไฟต์ และ ริตวิชแกรฟีนออกไซด์ เป็นอนุภาคนำไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ ในอัตราส่วน น้ำมันผสม : แกรไฟต์เป็น 5:1, 5:2, 5:3, 5:4 และ 5:5 โดยน้ำหนัก สูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ถูกนำมาพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใส และกระดาษคาร์ตโปร และฉายรังสี UV ก่อนนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความต้านทานน้ำ, สมบัติทางไฟฟ้า และ จำลองการต่อวงจรโดยใช้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร

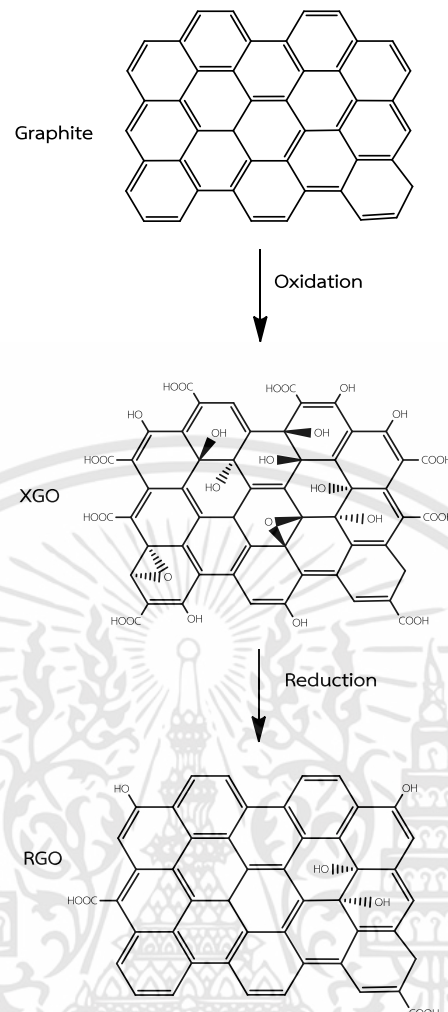
4.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า

จากการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ (XGO) จากผงแกรไฟต์ โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มธาตุออกซิเจนในโครงสร้าง ได้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ผลแสดงดังในรูปที่ 4.1 พบว่า FTIR สเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ (XGO) แสดงพีคที่ตำแหน่ง 3396 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ O-H stretching และที่ตำแหน่ง 1720 และ 1070 cm^{-1} เป็นพีคของ C=O และ C-O ตามลำดับ สัญญาณที่ 1589 cm^{-1} แสดงพีคของ C=C [46] พีคของตำแหน่งพันธะ C-O-C ของวงอีพ็อกไซด์ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 1222 cm^{-1} [30, 39, 46, 47] และเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันเพื่อทำให้เกิดเป็นริตวิชแกรฟีนออกไซด์ (RGO) พบว่า พีคที่ตำแหน่ง 3404 , 1704 และ 1109 cm^{-1} แสดงสัญญาณของพันธะ O-H, C=O, และ C-O ตามลำดับ มีความเข้มของพีคที่ลดลงเมื่อเทียบกับ FTIR สเปกตรัมของ XGO [39, 46] ซึ่งแสดงถึงปริมาณออกซิเจนที่ลดลงเมื่อ XGO ถูกทำปฏิกิริยารีดักชัน และเปลี่ยนรูปเป็นริตวิชแกรฟีนออกไซด์แบบจำลองการสังเคราะห์ XGO และ RGO แสดงในรูปที่ 4.2

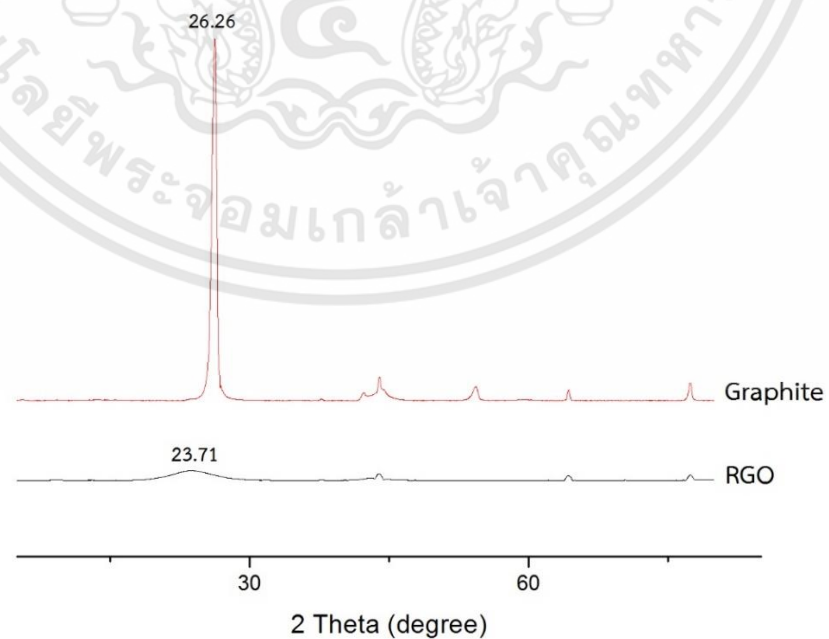


รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของแกรไฟต์, แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์เปรียบเทียบกับ RGO ที่ได้จากการสังเคราะห์จากผงแกรไฟต์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยพีคหลักของแกรไฟต์ปรากฏที่ค่า 2θ เท่ากับ 26.26 องศา มีลักษณะพีคแหลม และมีความเข้มของพีคสูง ซึ่งแสดงถึงระนาบ (002) [42, 46] ของแกรไฟต์ ซึ่งจากการทดสอบด้วย X-ray diffractometer ทำให้ทราบระยะห่างระหว่างชั้นอนุภาค (d-spacing) ของแกรไฟต์มีค่าเท่ากับ 3.39 \AA [46] ส่วนผลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ RGO พบว่าพีคหลักเลื่อนไปที่ตำแหน่ง 23.71 องศา ซึ่งระบุถึงระนาบ (002) [32] มีลักษณะเป็น broad peak และมีค่า d-spacing 3.75 \AA และมีความเข้มพีคที่ลดลงอย่างมาก เนื่องจาก โครงสร้างของแผ่น RGO เกิดการแยกชั้นจากแกรไฟต์จากการทำปฏิกิริยาทางเคมี และความร้อน ทำให้ความเป็นผลึกของ RGO ลดลงเมื่อเทียบกับแกรไฟต์ [40, 46] ส่วนแกรฟีนออกไซด์ก่อนนำไปรีดิวซ์ (XGO) มีลักษณะของอนุภาคที่พองตัว และไม่เรียงตัวเป็นระนาบ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้อาศัยหลักของการหักเหของรังสีเอ็กซ์เมื่อไปกระทบกับผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งหากนำตัวอย่างที่มีลักษณะของพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอมาทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์อาจเกิดความคลาดเคลื่อน หรือได้รูปแบบความเป็นผลึกที่ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง



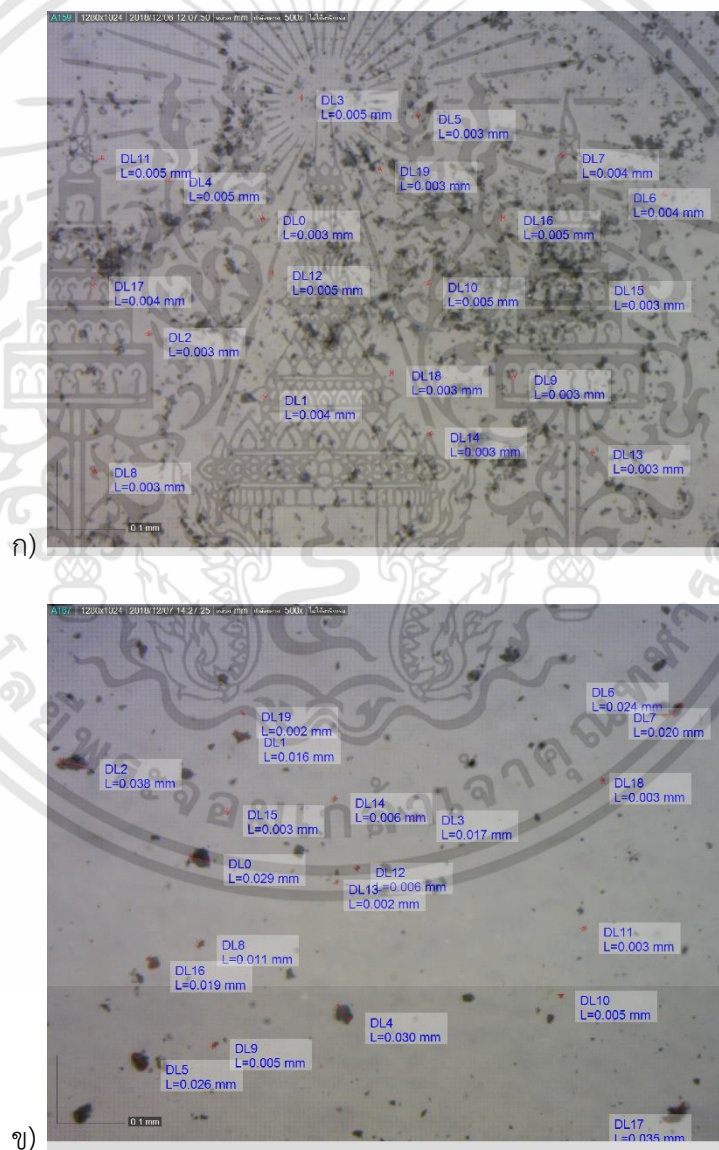
รูปที่ 4.2 แบบจำลองการสังเคราะห์ XGO และ RGO



รูปที่ 4.3 XRD pattern แกรไฟต์ และ RGO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของอนุภาคแกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล กำลังขยาย 500 เท่า โดยตัวอย่างของรูปถ่ายอนุภาคแกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ที่แสดงดัง รูปที่ 4.4 พบว่า แกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3-5 และ 2-38 μm ตามลำดับ ขนาดของรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ที่เตรียมได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคแกรไฟต์ตั้งต้น เนื่องจากอนุภาครีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันที่เหลืออยู่บนโครงสร้างหลังผ่านกระบวนการทางเคมี และยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง โดยการที่อนุภาคมีขนาดเล็กแสดงถึงพื้นที่ผิวของอนุภาคที่มากขึ้น นอกจากนี้ความมีข้อั้วส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค จึงเกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคบางส่วนของรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ทำให้ได้มีลักษณะเป็นแผ่น และมีการกระจายของขนาดทั้งขนาดที่ใกล้เคียง และขนาดที่ใหญ่กว่าแกรไฟต์ตั้งต้น



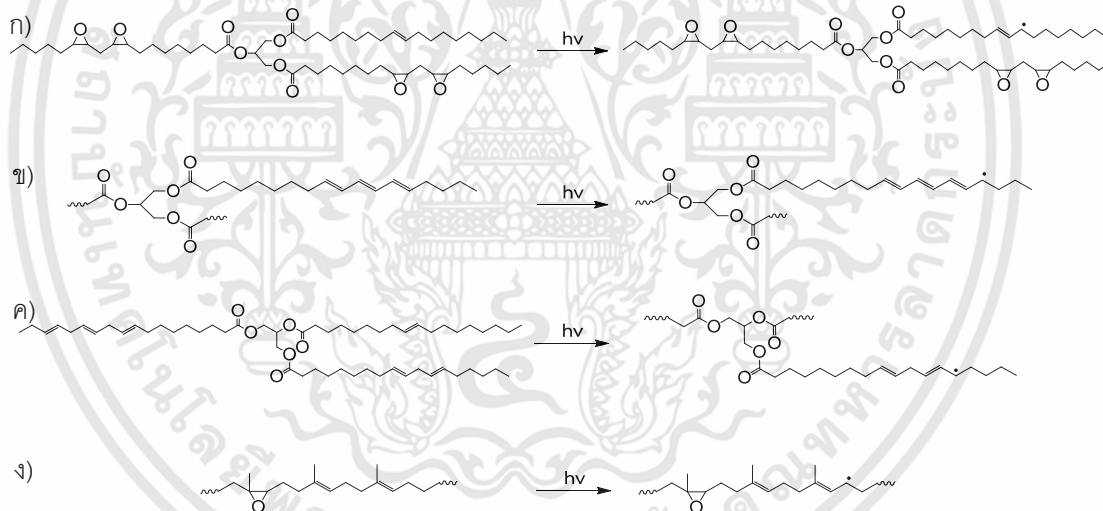
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างรูปถ่ายอนุภาค ก) แกรไฟต์ และ ข) รีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

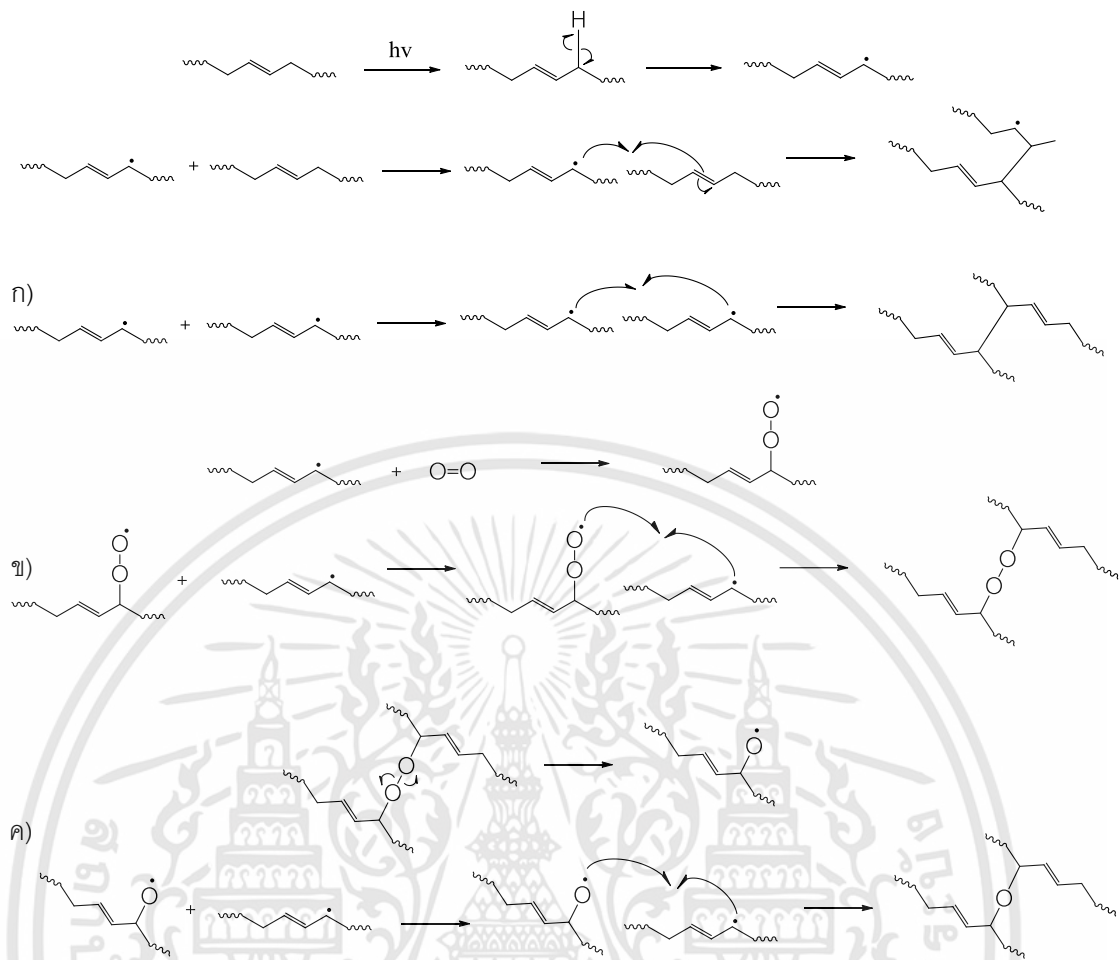
4.2 ผลของน้ำมันชักแห้งต่อการแห้งของสูตรน้ำมันผสม

ในสูตรน้ำมันผสมมีการใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENR) เพื่อช่วยเพิ่มความหนืดให้กับหมึกพิมพ์ และเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดของอนุภาคคาร์บอน โดยความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของ ENR ในตัวทำละลาย ESO เป็นความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถเตรียมได้ การเตรียมสูตรน้ำมันผสมทำโดยนำสารละลาย ENR มาผสมร่วมกับน้ำมันชักแห้ง ได้แก่ น้ำมันทัง และ น้ำมันลินสีด และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำมันทัง และน้ำมันลินสีด ดังแสดงในตารางที่ 3.3 เพื่อศึกษาระยะเวลาในการแห้งที่ผิวของสูตรน้ำมันผสมแต่ละสูตรเมื่อได้รับการฉายรังสี UV และเลือกสูตรที่ใช้เวลาในการแห้งที่เหมาะสมไปใช้ในการเตรียมหมึกต่อไป

กระบวนการแห้งตัวของน้ำมันเกิดจากการที่รังสี UV สามารถกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่งอัลไลลิก [36] และ พันธะคู่ที่อยู่บนโครงสร้างของ ESO, ENR, น้ำมันทัง และ น้ำมันลินสีด เกิดการสลายพันธะเป็นอนุมูลอิสระ และเกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างของส่วนผสมในน้ำมันผสม โดยแบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 แบบจำลองการเกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่ง allylic บนโครงสร้างของโครงสร้าง ก) ESO, ข) น้ำมันทัง, ค) น้ำมันลินสีด และ ง) ENR



รูปที่ 4.6 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงแบบอนุมูลอิสระ ระหว่าง ESO, ENR, น้ำมันทั้ง และ น้ำมันลินสีด เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง ก) -C-C-, ข) -C-O-O-C- และ ค) -C-O-C-

สูตรน้ำมันผสมที่เตรียมได้ นำไปพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใส และฉายรังสี UV ที่ช่วงเวลา 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที ทำการทดสอบโดยใช้ทรายโรยบนชิ้นงาน และใช้แปรงปิดตามหัวข้อที่ 3.10 เพื่อศึกษาเวลาในการแห้งที่ผิวของน้ำมันผสมโดยตรวจสอบทรายที่ติดบนผิวชิ้นงาน โดยกำหนดระดับการแห้งที่ผิวออกเป็น 4 ระดับ ดังนี้

- ระดับ 0 ชิ้นงานมีการแห้งที่ผิวอย่างสมบูรณ์ ไม่มีทรายติดที่พื้นผิว
- ระดับ 1 ชิ้นงานเริ่มมีการแห้งที่ผิว มีทรายติดที่ผิวเพียงเล็กน้อย
- ระดับ 2 ชิ้นงานมีทรายติดอยู่จำนวนมาก และทรายมีสีอ่อน
- ระดับ 3 ชิ้นงานไม่แห้ง มีทรายติดอยู่จำนวนมาก และทรายมีสีเข้มจากการเปียกของน้ำมัน

ตัวอย่างการแห้งที่ผิวของชิ้นงานที่ระดับต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.6 โดยผลการทดสอบที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า สูตร T1L1, T3L2 และ T4L1 เริ่มมีการแห้งที่ผิวระดับ 1 ตั้งแต่ช่วงนาทีที่ 10 และมีการแห้งที่ผิวมากขึ้น เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV มากขึ้น ส่วนสูตร T2L3 เริ่มมีการเอกลสารนี้เป็นเอกลสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แห้งที่ผิวเมื่อฉายรังสี UV 45 นาที และ สูตร T1L4 เป็นสูตรน้ำมันผสมที่ไม่มีการแห้งที่ผิว แม้มีการฉายรังสี UV นานถึง 60 นาที

จากผลการทดสอบ พบว่า สูตรที่ใช้สัดส่วนของน้ำมันทั้งหมด ใช้เวลาในการแห้งที่ผิวโดยการฉายรังสี UV สั้นกว่า เนื่องจาก โครงสร้างกรดไขมันของน้ำมันทั้งหมดมีระบบคอนจูเกต อนุพลอิสระที่เกิดขึ้นมีความเสถียรมากกว่าในกรณีของน้ำมันลินสีด ซึ่งมีโครงสร้างของกรดไขมันส่วนใหญ่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต จึงทำให้อนุพลอิสระเกิดขึ้นที่สายโซ่ของน้ำมันทั้งหมดได้มากกว่าในน้ำมันลินสีด ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงได้ดีกว่าน้ำมันลินสีด อย่างไรก็ตาม สูตรน้ำมันผสมที่มีสัดส่วนของน้ำมันทั้งหมดสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้แม้ไม่ได้รับรังสี UV ซึ่งทำให้น้ำมันผสมเกิดการเชื่อมโยงก่อนการนำไปใช้งานได้ ทำให้ส่งผลต่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเมื่อนำไปเตรียมเป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ผลที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ทราบว่า เวลาที่น้อยที่สุดที่น้ำมันผสมสามารถแห้งที่ผิวได้ คือ 10 นาที และ สูตรน้ำมันผสมที่เลือก เพื่อนำไปใช้ในการผสมสูตรหมึก คือ สูตร T1L1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีการใช้น้ำมันทั้งหมดน้อยที่สุดที่สามารถทำให้น้ำมันผสมเริ่มแห้งที่ผิว



รูปที่ 4.7 ระดับการแห้งที่ผิวของน้ำมันผสม

ตารางที่ 4.1 ระดับการแห้งที่ผิวของชิ้นงานน้ำมันผสมเมื่อผ่านการฉาย UV ที่เวลาต่าง ๆ

สูตร เวลา (นาท)	T1L4	T2L3	T1L1	T3L2	T4L1
1	3	3	3	3	3
5	3	2	2	2	2
10	3	2	1	1	1
15	3	2	1	1	1
20	3	1	1	1	0
30	3	1	0	0	0
45	3	1	0	0	0
60	3	1	0	0	0

4.3 การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

สูตรน้ำมันผสมที่เลือกนำมาผสมกับคาร์บอนนำไฟฟ้า เพื่อเตรียมเป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า คือ สูตร T1L1 เนื่องจาก เป็นสูตรน้ำมันผสมที่มีการแห้งที่ผิวได้ดีเมื่อได้รับรังสี UV โดยนำน้ำมันผสมสูตร T1L1 มาเติมคาร์บอนนำไฟฟ้าในอัตราส่วนต่าง ๆ และองค์ประกอบของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแต่ละสูตร แสดงในตารางที่ 3.4

หมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรพบว่ามีความหนืดที่แตกต่างกัน โดยความหนืดของหมึกพิมพ์เพิ่มขึ้น เมื่อมีสัดส่วนการใช้ปริมาณแกรไฟต์ในหมึกพิมพ์เพิ่มขึ้น โดยหมึกพิมพ์สูตร T1L1G10 มีความหนืดสูงที่สุด มีลักษณะเป็นก้อน และ ไม่สามารถใช้พิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใสได้ แสดงถึงข้อจำกัดของการเติมแกรไฟต์ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็ง ส่วนสูตรอื่น ๆ สามารถพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใสได้ ดังนั้น สูตรหมึกพิมพ์ที่นำมาศึกษาเวลาในการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์ ได้แก่ สูตร T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8

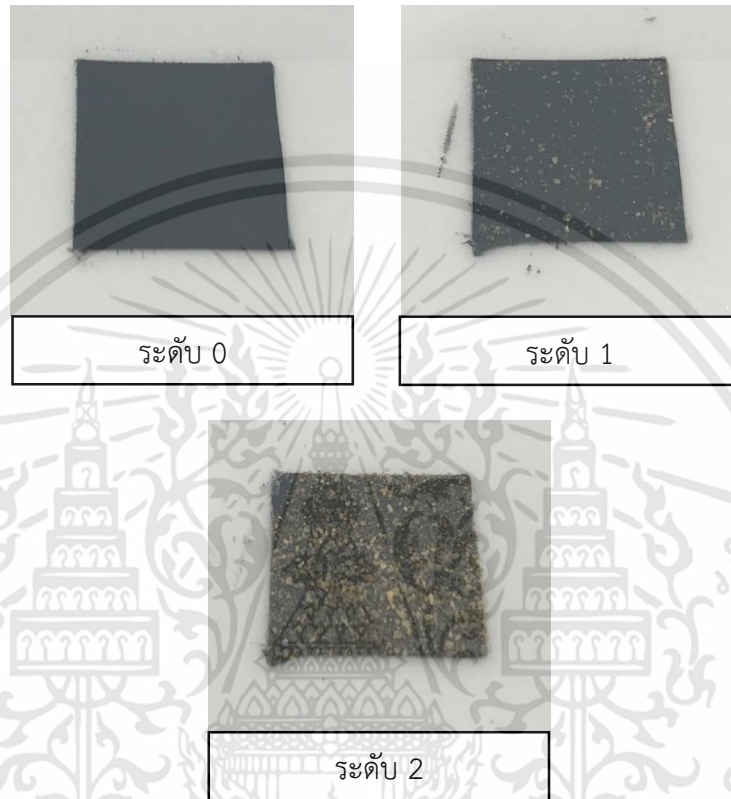
4.3.1 ศึกษาเวลาในการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าถูกทำให้แห้งโดยการฉายรังสี UV เป็นเวลา 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที และนำไปทดสอบตามหัวข้อที่ 3.11.1 เพื่อศึกษาเวลาในการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์โดยตรวจสอบจากทรายที่ติดบนผิวชิ้นงาน โดยกำหนดระดับการแห้งที่ผิว 3 ระดับ ดังนี้

- ระดับ 0 ชิ้นงานมีการแห้งที่ผิวอย่างสมบูรณ์ ไม่มีทรายติดที่พื้นผิว
- ระดับ 1 ชิ้นงานเริ่มมีการแห้งที่ผิว มีทรายติดที่ผิวเพียงเล็กน้อย
- ระดับ 2 ชิ้นงานมีทรายติดอยู่จำนวนมาก

รูปตัวอย่างการแห้งที่ผิวของชิ้นงานที่ระดับต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.7 โดยผลการทดสอบการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า สูตร T1L1G2 สามารถแห้งที่ผิวอย่างสมบูรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ระดับ 0) โดยชิ้นงานไม่มีทรายติดที่พื้นผิว หลังการฉายรังสี UV เป็นเวลา 30 นาที ส่วนสูตร T1L1G4, T1L1G และ T1L1G8 สามารถแห้งที่ผิวอย่างสมบูรณ์เมื่อได้รับรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที โดยพบว่า การเติมอนุภาคแกรไฟต์ช่วยเร่งการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า นอกจากนี้ ปริมาณแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้การแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเกิดเร็วขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.8 ระดับการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2 ระดับการแห้งที่ผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเมื่อผ่านการฉาย UV ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	สูตร			
	T1L1G2	T1L1G4	T1L1G6	T1L1G8
1	2	2	2	2
5	2	1	1	1
10	1	0	0	0
15	1	0	0	0
20	1	0	0	0
30	0	0	0	0
45	0	0	0	0
60	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงวนวิชาหกรแข่งงนเพอการศกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใชประยชนดานการค้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์ที่ถูกทำให้แห้ง

ชิ้นงานหมึกพิมพ์ที่ถูกทำให้แห้งโดยการผ่านรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที นำมาศึกษาพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบใช้แสงที่กำลังขยาย 60 เท่า และ 500 เท่า โดยพื้นผิวของชิ้นงานสูตรน้ำมันผสม T1L1 แสดงในรูปที่ 4.9 ก) และ 4.9 ข) ตามลำดับ พบว่า พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยย่นคล้ายรอยแตกจำนวนมาก เช่นเดียวกับกับพื้นผิวของชิ้นงานในสูตร T1L1G2 และ T1L1G4 มีพื้นผิวที่เป็นรอยย่นทั้งที่กำลังขยาย 60 เท่า (รูปที่ 4.9 ข) และ 4.9 ค)) และที่ 500 เท่า (รูปที่ 4.9 ช) และ 4.9 ซ)) สำหรับสูตร T1L1G6 พบว่า มีพื้นผิวที่เรียบจากภาพที่กำลังขยาย 60 เท่า (รูปที่ 4.9 ง)) แต่เมื่อใช้กำลังขยายที่สูงขึ้น (รูปที่ 4.9 ฉ)) พบว่าชิ้นงานยังคงมีลักษณะคล้ายกับสูตรข้างต้น ส่วนสูตร T1L1G8 มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบทั้งที่กำลังขยายต่ำ และ กำลังขยายสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จ) และ 4.9 ฉ) ตามลำดับ

ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าส่วนใหญ่พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยแตก และรอยย่น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของน้ำมันต่าง ๆ ในชิ้นงานสูตรน้ำมันผสม เมื่อชิ้นงานน้ำมันผสม หรือหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าได้รับรังสี UV ซึ่งมีพลังงานสูง เร่งให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นที่โครงสร้างของน้ำมัน แล้วเกิดการเชื่อมโยงผ่านอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น บริเวณด้านบนของหมึกพิมพ์ได้รับรังสี UV ก่อนจึงเกิดการเชื่อมโยงเกิดเป็นชั้นของแข็ง ในขณะที่ชั้นล่างของหมึกพิมพ์ยังมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด จึงทำให้ที่บริเวณผิวด้านบนเกิดการหดตัวในทิศทางที่เป็นอิสระ และเกิดการแยกกันของพื้นผิว เมื่อหมึกพิมพ์แห้งตัวจึงเห็นลักษณะรอยแตก และรอยย่นบนชิ้นงานหมึกพิมพ์ ดังเช่นพื้นผิวของหมึกพิมพ์สูตร T1L1, T1L1G2 และ T1L1G4 ซึ่งเป็นสูตรหมึกพิมพ์ที่มีปริมาณอนุภาคแกรไฟต์น้อย เมื่อเทียบกับสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 เกิดรอยย่นที่พื้นผิวหมึกพิมพ์น้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้แกรไฟต์ในสูตรหมึกพิมพ์ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวหมึกพิมพ์เมื่อแห้งตัว ซึ่งแกรไฟต์เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมันผสม โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กแสดงถึงพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมีมาก ทำให้สามารถช่วยขัดขวางการหดตัวของฟิล์มน้ำมันผสมเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้ ส่งผลให้ช่วยลดการเกิดรอยย่นบนพื้นผิวของฟิล์มหมึกพิมพ์ และมีพื้นผิวที่เรียบได้มากขึ้น เมื่อมีการใช้แกรไฟต์ในปริมาณที่มากขึ้น

จากผลการแห้งที่ผิวของหมึกพิมพ์ในหัวข้อที่ 4.3.1 และการศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานในหัวข้อที่ 4.3.2 แสดงให้เห็นว่า หมึกพิมพ์สูตรที่ใช้ปริมาณแกรไฟต์มากสามารถแห้งที่ผิวได้เร็วกว่า โดยเห็นได้จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 สูตร T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8 มีการแห้งผิวที่สมบูรณ์ เมื่อได้รับการฉายรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที ในขณะที่ สูตร T1L1G2 มีการแห้งผิวอย่างสมบูรณ์ เมื่อฉายรังสี UV เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์ โดยพื้นผิวของหมึกพิมพ์มีลักษณะเป็นรอยย่นในสูตร T1L1G2 และ T1L1G4 และฟิล์มหมึกพิมพ์มีพื้นผิวที่เรียบมากขึ้น ในสูตรที่ใช้ปริมาณแกรไฟต์มากขึ้น

สูตร	กำลังขยาย 60 เท่า	กำลังขยาย 500 เท่า
T1L1		
T1L1G2		
T1L1G4		
T1L1G6		
T1L1G8		

รูปที่ 4.9 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกนำไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล ที่กำลังขยาย 60 เท่า ก) – จ) และ ที่กำลังขยาย 500 เท่า ฉ) – ญ) ของสูตร T1L1, T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ปริมาณแกรไฟต์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า

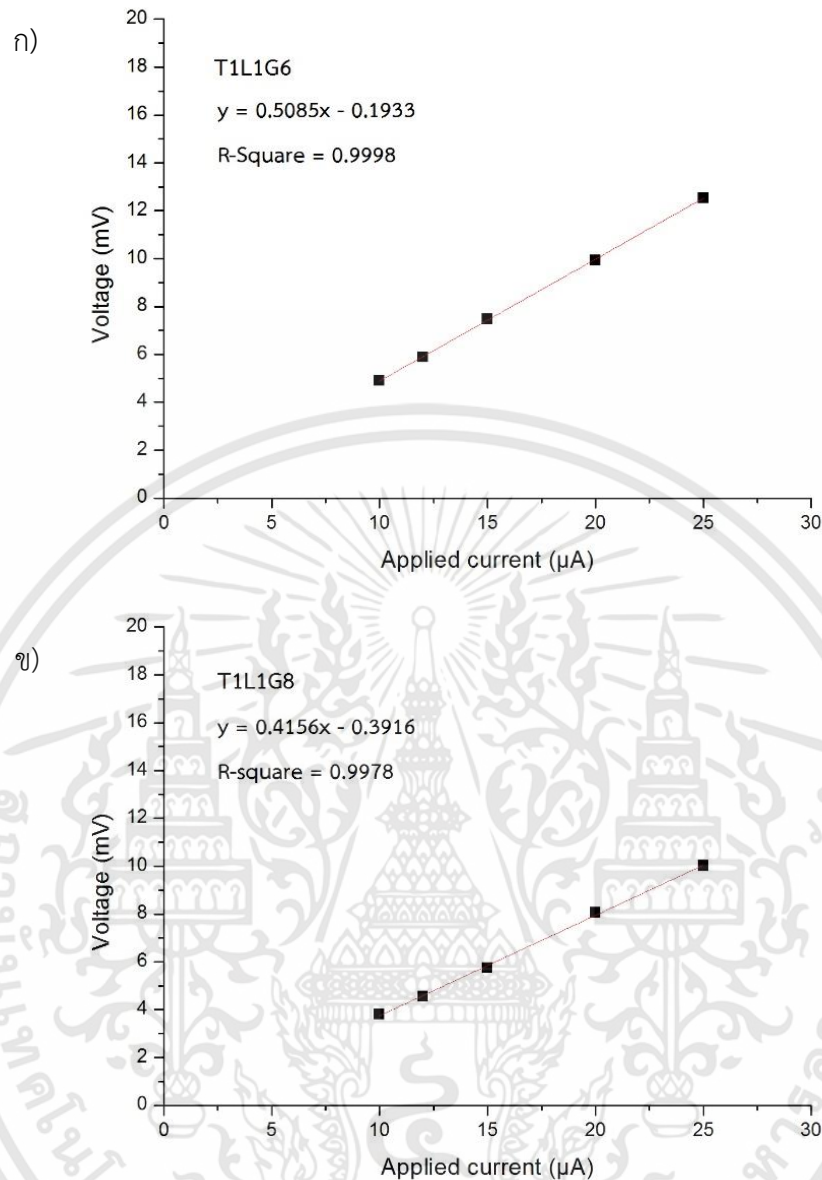
แกรไฟต์เป็นอนุภาคคาร์บอนที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับหมึกพิมพ์ที่ต้องการสมบัติในการนำไฟฟ้า โดยชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ผ่านการเชื่อมโยงจนกลายเป็นฟิล์มที่แห้งแล้ว นำมาทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (4-point probe method) ตามหัวข้อที่ 3.11.3 โดยวัดค่าความต่างศักย์ (V) ที่แต่ละค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้ไป (I) เมื่อนำมาสร้างกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไป (แกน Y) กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้ (แกน X) จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละสูตร (รูปที่ 4.10) และทราบค่าสภาพต้านทาน (Resistance ; R) จากความชันของสมการเส้นตรงที่เกิดจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ (V) โดยข้อมูลต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.3 โดยจากขั้นตอนการทดสอบ พบว่า สูตร T1L1G2 และ T1L1G4 ไม่สามารถตรวจวัดค่าความต่างศักย์ได้ เนื่องจาก ทั้งสองสูตรนี้มีการใช้อนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณน้อย ทำให้ส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าระหว่างอนุภาคแกรไฟต์ และนอกจากนี้ การทดสอบโดยใช้วิธีเข็มวัด 4 จุดเป็นการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุ ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบควรมีพื้นผิวที่เรียบเพื่อให้การตรวจวัดเป็นไปอย่างถูกต้อง จากการศึกษาพื้นผิวในหัวข้อ 4.3.2 พบว่า สูตร T1L1G2 และ T1L1G4 พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยย่น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่ไม่สามารถทดสอบบนพื้นผิวที่ไม่เรียบได้ ส่วนสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 สามารถตรวจวัดค่าความต่างศักย์ด้วยวิธีนี้ได้

ค่าสภาพต้านทานของสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 ที่ได้จากกราฟนำมาสรุป และแสดงค่าในตารางที่ 4.3 และข้อมูลที่ได้นำไปคำนวณ เพื่อรายงานเป็นค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance ; R_s) จากสมการที่ 2.13

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \quad (2.13)$$

โดยที่ $R = \frac{V}{I}$

ค่า R_s ที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.3 สูตร T1L1G6 และ T1L1G8 มีค่า R_s เท่ากับ 2.3047 และ 1.8837 $k\Omega/sq$ ตามลำดับ พบว่า ค่า R_s ของสูตร T1L1G8 มีค่าน้อยกว่าสูตร T1L1G6 เนื่องจาก สูตร T1L1G8 มีปริมาณแกรไฟต์ในสูตรมากกว่า T1L1G6 ทำให้มีความต่อเนื่องกันของอนุภาคแกรไฟต์ กระแสไฟฟ้าจึงสามารถส่งผ่านบนอนุภาคที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแกรไฟต์ในหมึกพิมพ์ที่เพิ่มขึ้นสามารถลดสภาพความต้านทานของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าลงได้ โดยสมบัติความต้านทานไฟฟ้าแปรผกผันกับสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ ดังนั้น สูตร T1L1G8 จึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูงกว่า สูตร T1L1G6



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (V) ของสูตร ก) T1L1G6 และ ข) T1L1G8

ตารางที่ 4.3 ค่าสภาพต้านทาน (R) และสภาพต้านทานเชิงแผ่น (R_s) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์

สูตร	R (k Ω)	R_s (k Ω /sq)
T1L1G2	NA	NA
T1L1G4	NA	NA
T1L1G6	0.5085	2.3047
T1L1G8	0.4156	1.8837

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบจึงได้เลือกสูตร T1L1G8 ซึ่งเป็นสูตรที่แสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด จากสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของแกรไฟต์ เพื่อใช้เป็นสูตรตั้งต้นของการศึกษาผลของการใช้ออนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในหัวข้อต่อไป

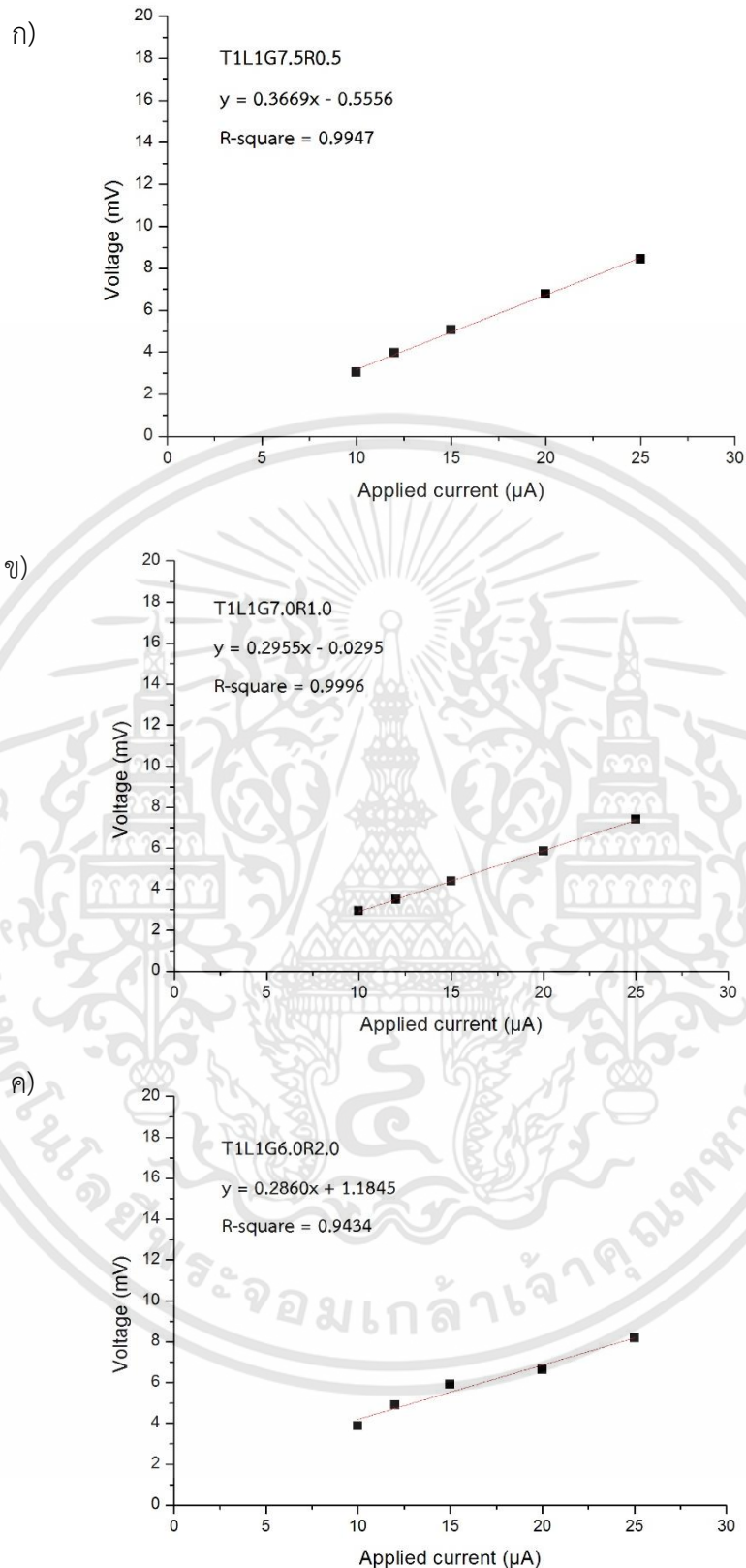
4.4 ผลของการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นอนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าอีกชนิดที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี จึงทำการศึกษาผลของการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้สูตร T1L1G8 และทำการปรับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคแกรไฟต์ : รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เป็น 7.5:0.5, 7.0:1.0 และ 6.0:2.0 ดังแสดงในตารางที่ 3.5 เพื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์เมื่อมีการปรับสัดส่วน และชนิดของคาร์บอนนำไฟฟ้า

4.4.1 ปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์

ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีการใช้ออนุภาคแกรไฟต์ร่วมกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการเชื่อมโยงโดยรังสี UV แล้ว นำมาทดสอบความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด เช่นเดียวกับหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีการใช้ออนุภาคแกรไฟต์เพียงชนิดเดียว และทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหล (I) กับ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ (V) (รูปที่ 4.11) เพื่อหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (R_s) จากความชันของสมการเส้นตรง และใช้ค่าความชันเฉลี่ยคำนวณหาค่า R_s จากสมการที่ (1) โดยข้อมูลต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.4

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ หมึกพิมพ์สูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีค่า R_s เท่ากับ 1.6629, 1.3574 และ 1.2963 $k\Omega/sq$ ตามลำดับ พบว่า สูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นองค์ประกอบมีค่า R_s ต่ำกว่าสูตร T1L1G8 ซึ่งเป็นสูตรที่ไม่มีส่วนประกอบของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และค่า R_s มีค่าต่ำลง ในสูตรหมึกพิมพ์ที่มีการใช้ออนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มากขึ้น โดย ค่า R_s มีค่าต่ำที่สุดในสูตร T1L1G6.0R2.0 ซึ่งเป็นสูตรที่มีการใช้ปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าแกรไฟต์ เนื่องจากมีการปรับอัตราส่วนการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เพียงเล็กน้อย แต่สามารถส่งผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าลดลงได้ เมื่อเทียบกับสูตรที่มีการใช้แกรไฟต์เป็นอนุภาคนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว



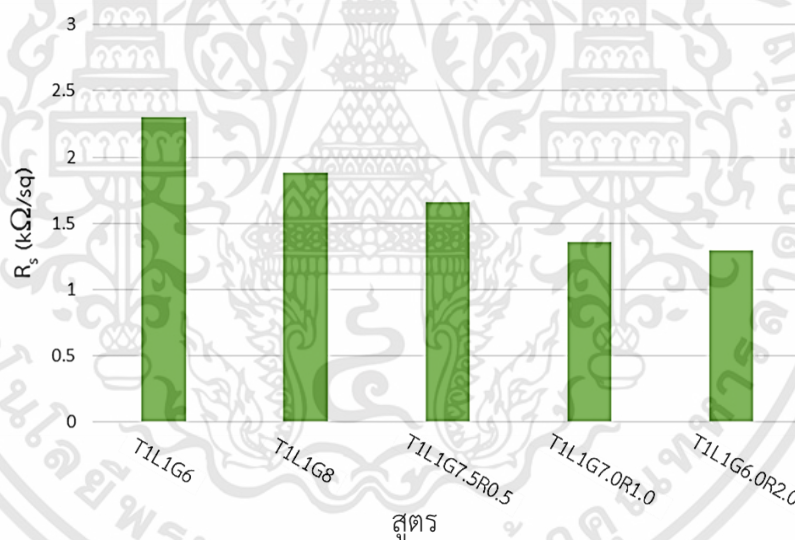
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ให้ (I) กับความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (V) ของสูตร ก) T1L1G7.5R0.5 ข) T1L1G7.0R1.0 และ ค) T1L1G6.0R2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าสภาพต้านทาน (R) และสภาพต้านทานเชิงแผ่น (R_s) ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ร่วมกับบริดจ์แกรฟีนออกไซด์

สูตร	R ($k\Omega$)	R_s ($k\Omega/sq$)
T1L1G8	0.4156	1.8837
T1L1G7.5R0.5	0.3669	1.6629
T1L1G7.0R1.0	0.2995	1.3574
T1L1G6.0R2.0	0.2860	1.2963

จากการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ทำให้ทราบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อมีการใช้ปริมาณแกรไฟต์ที่มากขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนอนุภาคบริดจ์แกรฟีนออกไซด์ที่มากขึ้น (รูปที่ 4.12) แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ขึ้นอยู่กับปริมาณของแกรไฟต์ และสัดส่วนการใช้อนุภาคบริดจ์แกรฟีนออกไซด์ต่อแกรไฟต์ที่สูงขึ้น

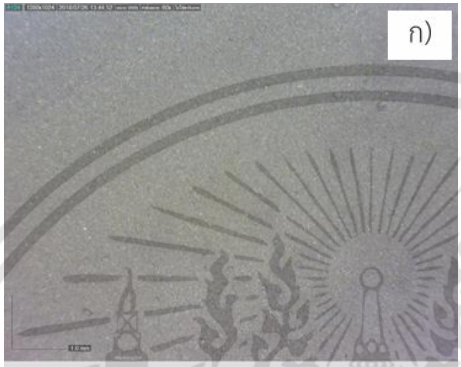
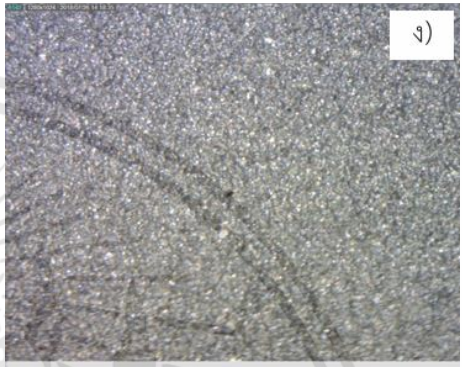

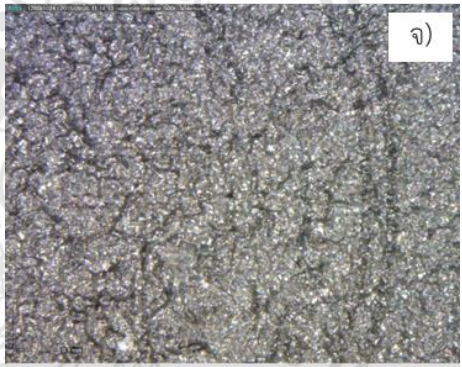

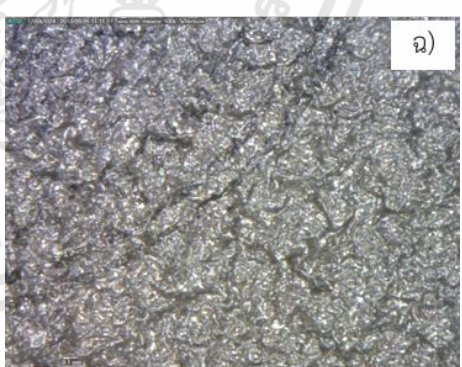


รูปที่ 4.12 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานเชิงแผ่น (R_s) ของหมึกพิมพ์สูตรต่าง ๆ

4.4.2 ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้แกรไฟต์ร่วมกับบริดจ์แกรฟีนออกไซด์

ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ถูกทำให้แห้งโดยการฉายรังสี UV เป็นเวลา 10 นาที นำมาศึกษาพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบใช้แสงที่กำลังขยาย 60 และ 500 เท่า โดยพื้นผิวของชิ้นงานสูตร T1L1G7.5R0.5 แสดงผลดังรูปที่ 4.13 ก) และ 4.13 ง) พบว่ามีลักษณะพื้นผิวเรียบทั้งที่ใช้กำลังขยาย 60 เท่า และ 500 เท่า คล้ายกับพื้นผิวของชิ้นงานในสูตร T1L1G8 ส่วนพื้นผิวของชิ้นงานสูตร T1L1G7.0R1.0 (รูปที่ 4.13 ข) และ 4.13 จ)) และ T1L1G6.0R2.0 (รูปที่ 4.13 ค)) และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 ฉ) มีลักษณะพื้นผิวที่มีรอยย่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตร T1L1G8 เนื่องจากมีการเพิ่มปริมาณการใช้ RGO ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอนุภาคของ RGO ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของ RGO ลดลง และเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีเมื่ออยู่ในสูตรหมึกพิมพ์ ทำให้มีความสามารถในการขีดขวางการหดตัวของน้ำมันผสมเมื่อเกิดการเชื่อมโยงลดลง

สูตร	กำลังขยาย 60 เท่า	กำลังขยาย 500 เท่า
T1L1G7.5R0.5	 ก)	 ง)
T1L1G7.0R1.0	 ข)	 จ)
T1L1G6.0R2.0	 ค)	 ฉ)

รูปที่ 4.13 พื้นผิวของชิ้นงานหมึกนำไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล ที่กำลังขยาย 60 เท่า ก) – ค) และ ที่กำลังขยาย 500 เท่า ง) – ฉ) ของสูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0

4.4.3 ศึกษาความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์ที่แห้งแล้ว

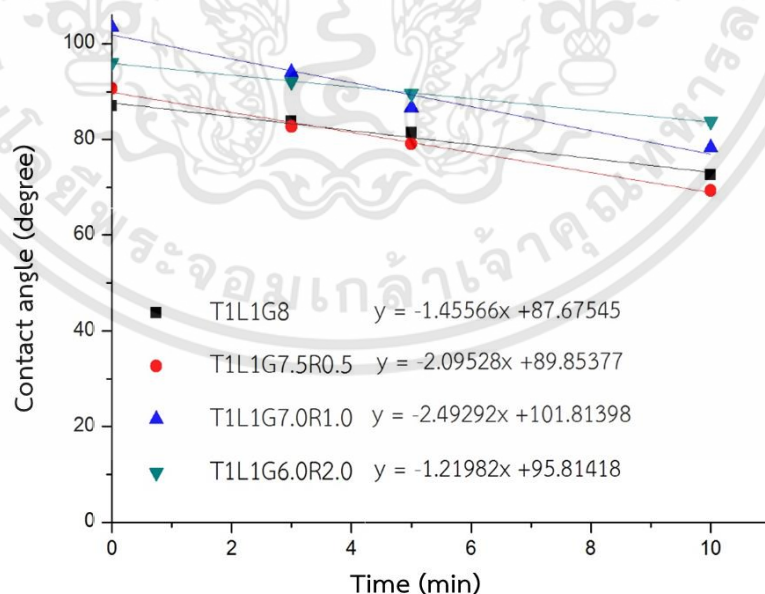
การวิเคราะห์ผลการตรวจวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน แสดงถึงความชอบน้ำของวัสดุหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ ซึ่งความชอบน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านทานน้ำของหมึกพิมพ์ โดยการศึกษาความสามารถในการต้านทานน้ำของพื้นผิวหมึกพิมพ์มีความสำคัญต่อสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า เนื่องจาก จุดประสงค์หลักในการใช้หมึกพิมพ์นำไฟฟ้า คือเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ดังนั้น น้ำ หรือความชื้นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อวงจรไฟฟ้าได้ จึงทำการทดสอบหาค่ามุมสัมผัสเพื่อศึกษาความต้านทานน้ำของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ นำไปทดสอบความสามารถในการต้านทานน้ำด้วยการหาค่ามุมสัมผัส (Contact angle) บนพื้นผิวของชิ้นงาน หากชิ้นงานมีค่ามุมสัมผัสอยู่ในช่วงน้อยกว่า 90 องศา แสดงถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดี (Wettability) และหากมีค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา สามารถบ่งบอกได้ถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี (Non-wettability) [43-45]

ค่ามุมสัมผัสของหมึกพิมพ์ที่เวลาต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ค่ามุมสัมผัสของแต่ละสูตรมีค่ามากที่สุดที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) โดย สูตร T1L1G8 มีค่ามุมสัมผัส 86.9 องศา ส่วนค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวสูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีค่าเท่ากับ 90.6, 103.4 และ 96.0 องศา ตามลำดับ แสดงถึงความสามารถในการต้านทานน้ำได้ดีของพื้นผิวชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ซึ่งให้ผลขัดแย้งจากการที่สูตรหมึกพิมพ์ที่มีองค์ประกอบของ RGO ซึ่งเป็นอนุภาคคาร์บอนที่มีธาตุออกซิเจนเหลืออยู่ในโครงสร้างบางส่วนจึงทำให้ความมีขี้ของ RGO สูงขึ้นด้วย โดยการที่มีองค์ประกอบในหมึกพิมพ์ที่มีความมีขี้ที่สูงขึ้นในหมึกพิมพ์ ค่ามุมสัมผัสที่เกิดขึ้นควรที่ค่าลดลงเนื่องจากความมีขี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความชอบน้ำของวัสดุ [48] แต่พื้นผิวของชิ้นงานสูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีลักษณะเป็นรอยย่น (รูปที่ 4.13 ง), 4.13 จ) และ 4.13 ฉ)) โดยพื้นผิวของชิ้นงานที่มีความขรุขระอาจส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของงานวิจัยของ A. Ali และคณะ [49] และเมื่อวัดค่ามุมสัมผัสของพื้นผิววัสดุที่เวลาผ่านไป พบว่าค่ามุมสัมผัสของหมึกพิมพ์ทุกสูตรมีค่าลดลงเมื่อทิ้งให้หยดน้ำอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานนานขึ้น โดยเห็นได้จากคาร์้อยละการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส (ตารางที่ 4.6) เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที มุมสัมผัสของพื้นผิวชิ้นงานหมึกพิมพ์สูตร T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีการเปลี่ยนแปลงไปร้อยละ 16.6, 23.5, 24.2 และ 12.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ

สูตร	มุมสัมผัส (องศา)			
	0 นาที	3 นาที	5 นาที	10 นาที
T1L1G8	86.9	83.7	81.3	72.5
T1L1G7.5R0.5	90.6	82.7	79.1	69.3
T1L1G7.0R1.0	103.4	94.0	86.6	78.4
T1L1G6.0R2.0	96.0	92.1	89.5	83.7

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสกับเวลา (รูปที่ 4.14) ความชันจากกราฟเส้นตรงที่ได้แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสของหยดน้ำบนชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยสูตร T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเป็น 1.45, 2.09, 2.49 และ 1.22 องศา/นาที พบว่า สูตรที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสต่ำที่สุดคือ สูตร T1L1G6.0R2.0 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานมีพื้นผิวที่มีความชอบน้ำต่ำกว่าชิ้นงานหมึกพิมพ์สูตรอื่น ๆ แต่ยังมีการแทรกซึมของน้ำเข้าไปยังชิ้นงานหมึกพิมพ์ได้ เนื่องจาก ในอัตราส่วนองค์ประกอบของหมึกพิมพ์มีการใช้ปริมาณคาร์บอนนำไฟฟ้าสูงอาจทำให้น้ำมันผสมไม่สามารถล้อมรอบอนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าได้ทั้งหมด เกิดเป็นช่องว่างขนาดเล็กขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในชิ้นงาน และทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าลดลงได้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสกับเวลาของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตร T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไป 3, 5 และ 10 นาที

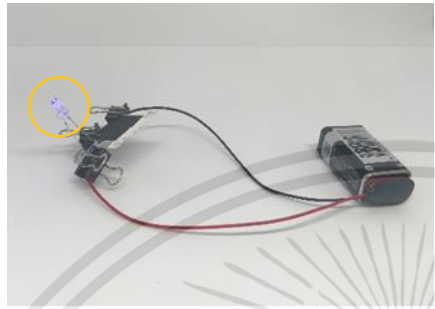
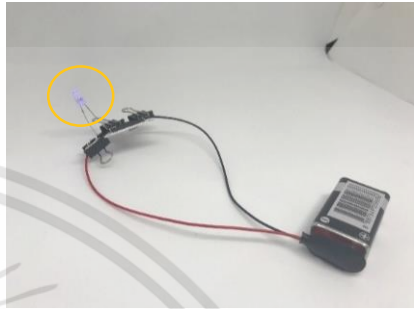
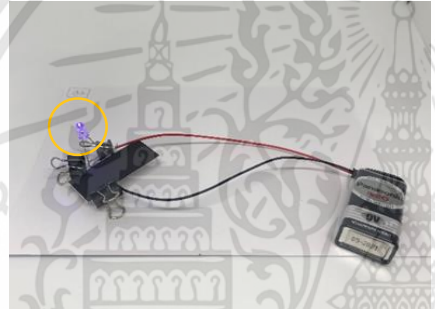
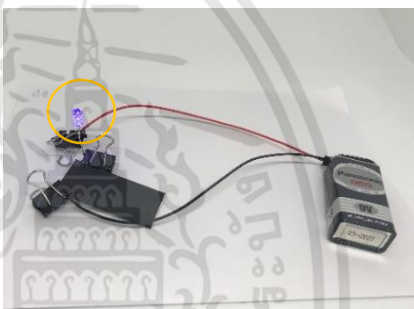
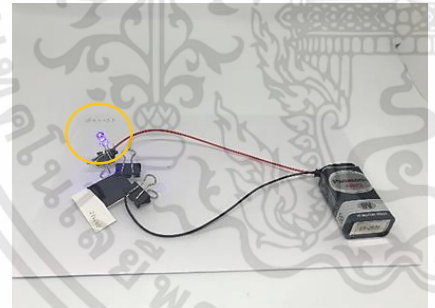
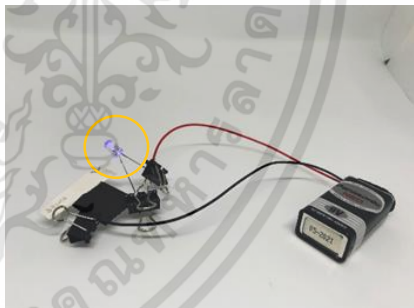
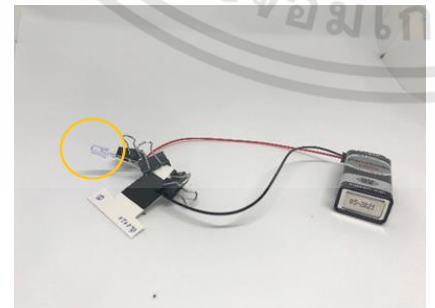
สูตร	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส			อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส (องศา/นาที)
	3 นาที	5 นาที	10 นาที	
T1L1G8	3.7	6.4	16.6	1.5
T1L1G7.5R0.5	8.7	12.7	23.5	2.1
T1L1G7.0R1.0	9.1	16.3	24.2	2.5
T1L1G6.0R2.0	4.1	6.7	12.8	1.2

4.5 การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร

การประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจรเป็นการจำลองจากการใช้งานจริง โดยทำการประกอบวงจรตามหัวข้อที่ 3.11.5 โดยใช้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตร T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6, T1L1G8, T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 เป็นส่วนหนึ่งของวงจร ภาพการประกอบวงจรไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยพบว่าชิ้นงานทุกสูตรสามารถทำให้หลอด LED เกิดแสงสว่างขึ้นได้ และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสว่างของหลอดไฟ LED ในสูตรที่ใช้แกรไฟต์เป็นองค์ประกอบ (T1L1G2, T1L1G4, T1L1G6 และ T1L1G8) พบว่า สูตร T1L1G2 และ T1L1G4 มีความสว่างของหลอดไฟ LED น้อยกว่าสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 แสดงให้เห็นว่า สูตร T1L1G2 และ T1L1G4 ซึ่งเป็นสูตรที่มีปริมาณแกรไฟต์ในหมึกพิมพ์น้อย มีความสามารถในการนำไฟฟ้าน้อยกว่าสูตร T1L1G6 และ T1L1G8 ซึ่งใช้ปริมาณแกรไฟต์ที่มากกว่า เนื่องจากเป็นผลของความต่อเนื่องกันของอนุภาคแกรไฟต์ที่ส่งผลต่อการส่งต่อกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวของหมึกพิมพ์ โดยในสูตรหมึกพิมพ์ที่มีปริมาณแกรไฟต์น้อย (T1L1G2 และ T1L1G4) มีความต่อเนื่องกันของอนุภาคแกรไฟต์ไม่ดีเนื่องจากมีปริมาณแกรไฟต์ที่ไม่มากพอ ทำให้มีการส่งต่อกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวชิ้นงานหมึกพิมพ์ไม่ดีเท่าที่ควร จึงส่งผลให้ความสว่างของหลอดไฟ LED ไม่มากเท่าชิ้นงานหมึกพิมพ์สูตรที่ใช้ปริมาณแกรไฟต์ที่มากกว่า และยังสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า (หัวข้อที่ 4.3.3)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตร T1L1G8 กับ สูตรที่ปรับอัตราส่วนการใช้ RGO (สูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0) พบว่า สูตร T1L1G7.5R0.5 มีความสว่างใกล้เคียงกับสูตร T1L1G8 อย่างไรก็ตาม สูตร T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0 มีความสว่างน้อยกว่าสูตร T1L1G7.5R0.5 อย่างชัดเจน อาจเป็นผลเนื่องจากอนุภาค RGO ที่มีลักษณะเป็นแผ่นที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับขนาดของผงแกรไฟต์ ดังผลที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1 เมื่อเติมอนุภาค RGO ไปแทนที่การใช้แกรไฟต์บางส่วน ทำให้ RGO ซึ่งอยู่ในลักษณะของการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนมีการกระจายตัวในหมึกพิมพ์ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องมาจากสภาพผิวของ RGO ที่มีความแตกต่างจากน้ำมันผสม และแรงที่ใช้ในการผสมไม่มากพอที่ทำให้ RGO กระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในหมึกพิมพ์ ส่งผลให้อนุภาค RGO เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความไม่ต่อเนื่องกัน เมื่อนำไปพิมพ์เป็นชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจึงส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ และทำให้ความสว่างของหลอดไฟ LED ลดลง

สูตร	ภาพวงจร	สูตร	ภาพวงจร
T1L1G2		T1L1G4	
T1L1G6		T1L1G8	
T1L1G7.5R0.5		T1L1G7.0R1.0	
T1L1G6.0R2.0			

รูปที่ 4.15 ตัวอย่างการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยใช้ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของวงจร และใช้ถ่านไฟฉาย 9V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการจำลองประกอบวงจรโดยสังเกตความสว่างของหลอดไฟ LED พบว่าให้ผลขัดแย้งกับผลการนำไฟฟ้าในหัวข้อที่ 4.4.1 ที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการใช้ RGO กับสภาพความต้านทานเชิงแผ่น (R_s) โดยค่า R_s ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนในการใช้ RGO : แกรไฟต์มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุจากการตรวจวัดค่าสภาพความต้านทานจากวิธีเข็มวัดที่จุดเป็นการตรวจวัดบนพื้นที่เล็ก ๆ บนชิ้นงาน ทำให้มีค่าสภาพความต้านทานเชิงแผ่นของชิ้นงาน ที่มีอนุภาค RGO กระจายตัวอยู่บนชิ้นงานมีค่าต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ โดยกราฟที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงานสูตร T1L1G6.0L2.0 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ค) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9434 แสดงถึงการกระจายของค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับสูตรที่มีปริมาณ RGO น้อยกว่า (สูตร T1L1G7.5R0.5; $R^2=0.9947$ (รูปที่ 4.11 ก) และสูตร T1L1G7.0R1.0; $R^2=0.9996$ (รูปที่ 4.11 ข)) รวมถึงสูตร T1L1G8 ซึ่งไม่มีการเติม RGO (สูตร T1L1G8; $R^2=0.9978$ (รูปที่ 4.10 ข)) ซึ่งแสดงถึงในแต่ละบริเวณของพื้นผิวชิ้นงานมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน และนอกจากนี้ผลการศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหมึกพิมพ์ที่ได้จากรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า (รูปที่ 4.13) พบว่า ชิ้นงานหมึกพิมพ์สูตร T1L1G7.0L1.0 และ T1L1G6.0L2.0 มีรอยร่น คาดว่าเกิดจากการหดตัวของหมึกพิมพ์เมื่อเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง อาจทำให้เกิดการแยกออกจากกันของอนุภาคของคาร์บอนนำไฟฟ้าบนชิ้นงานหมึกพิมพ์เกิดการกระจายตัวที่ไม่เท่ากัน แม้มีการทำให้อนุภาคคาร์บอนเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในขั้นตอนการผสมแล้วก็ตาม ด้วยสาเหตุนี้ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของอนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าบนชิ้นงาน จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าของชิ้นงานหมึกพิมพ์ลดลงเมื่อนำชิ้นงานมาประกอบเป็นวงจรไฟฟ้า

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซีไดซ์, ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์, และน้ำมันชักแห้ง ซึ่งได้แก่ น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง โดยใช้แกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นอนุภาคนำไฟฟ้า โดยได้ทำการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และพิสูจน์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้าที่ใช้เป็นองค์ประกอบของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า และทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของน้ำมันทังต่อน้ำมันลินสีดที่ส่งผลต่อการแห้งเมื่อฉายรังสี UV และศึกษาผลของการใช้แกรไฟต์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้ ได้แก่ ระยะเวลาในการแห้งผิว, ลักษณะพื้นผิวหมึกพิมพ์เมื่อแห้ง, ความชอบน้ำของพื้นผิวชิ้นงานของฟิล์มหมึกพิมพ์ และสมบัติทางไฟฟ้า จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคาร์บอนนำไฟฟ้า พบว่าหมู่ฟังก์ชันมีการเปลี่ยนแปลง โดยพบหมู่ฟังก์ชันที่มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้นในโครงสร้างเมื่อนำแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นแกรฟีนออกไซด์ (XGO) และพบว่าหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวลดลงเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันเป็นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (RGO) ซึ่งยืนยันได้จากผลของ FTIR และผลที่ได้จาก XRD แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแกรไฟต์ไปเป็น RGO ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ นอกจากนี้อนุภาคของ RGO ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแกรไฟต์ตั้งต้นที่ใช้นำมาสังเคราะห์

ผลของอัตราส่วนการใช้ น้ำมันชักแห้งต่อการแห้งผิวของสูตรน้ำมันผสมได้ทำการศึกษา ระยะเวลาในการทำให้สูตรน้ำมันผสมเกิดการแห้งที่ผิวหลังได้รับรังสี UV พบว่า สูตร T1L1 เป็นสูตรที่ใช้อัตราส่วนของน้ำมันทังน้อยที่สุดที่ทำให้เริ่มเกิดการแห้งที่ผิวด้วยเวลา 10 นาที ซึ่งเป็นเวลาน้อยที่สุดที่เกิดการแห้งผิวของสูตรน้ำมันผสม จึงเลือกสูตร T1L1 เป็นสูตรน้ำมันผสมตั้งต้นในการนำมาเตรียมสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

การศึกษาสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้แกรไฟต์เป็นอนุภาคนำไฟฟ้า โดยได้ศึกษาปริมาณการใช้แกรไฟต์ที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า พบว่า หมึกพิมพ์สูตร T1L1G4, T1L1G และ T1L1G8 สามารถแห้งที่ผิวได้อย่างสมบูรณ์เมื่อได้รับการฉาย UV เป็นเวลา 10 นาที ส่วนพื้นผิวของหมึกพิมพ์มีลักษณะเรียบมากขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น โดยมีพื้นผิวที่เรียบที่สุดในสูตร T1L1G8 นอกจากนี้ปริมาณแกรไฟต์ที่เติมลงในหมึกพิมพ์ยังส่งผลต่อค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงานด้วย จากผลการทดสอบพบว่าสูตร T1L1G8 เป็นหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีองค์ของแกรไฟต์ที่มีค่าสภาพความต้านทานต่ำที่สุด

การศึกษาสมบัติของหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่ใช้อนุภาคแกรไฟต์ร่วมกับอนุภาค RGO โดยทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาปริมาณ RGO ที่ใส่เข้าไปแทนที่แกรไฟต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ค่าสภาพความต้านทานของ ชีงงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้ามีค่าลดลง ในสูตรที่มีอัตราส่วนการใช้ RGO เพิ่มสูงขึ้น โดยสูตร T1L1G6.0R2.0 เป็นสูตรที่มีค่าสภาพความต้านทานต่ำที่สุด นอกจากนี้ สูตร T1L1G6.0R2.0 ยังเป็น สูตรที่มีความชอบน้ำต่ำที่สุดด้วย

ผลที่ได้จากการทดสอบต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ทำให้สรุปได้ว่า งานวิจัยนี้สามารถเตรียมหมึก พิมพ์นำไฟฟ้าฐานน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งลดการปลดปล่อยไอระเหยที่เป็นพิษ ทำให้มีความปลอดภัยต่อ ผู้ใช้งาน และสิ่งแวดล้อม โดยสูตรหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่มีสมบัติทางไฟฟ้าดีที่สุด คือ สูตร T1L1G8 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้อัตราส่วนน้ำมันผสมต่อแกรไฟต์เป็น 5:4 ส่วนโดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่ามีค่าสภาพต้านทานสูง กว่าสูตรที่ใช้คาร์บอนนำไฟฟ้าเป็นแกรไฟต์ร่วมกับ RGO (สูตร T1L1G7.5R0.5, T1L1G7.0R1.0 และ T1L1G6.0R2.0) แต่จากการจำลองการต่อวงจรไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าสูตร T1L1G8 มีลักษณะพื้นผิว เรียบ และมีการกระจายของอนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอในทุกบริเวณมากกว่าเมื่อพิมพ์ เป็นชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับขั้นตอนการใช้งาน ลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้หมึกพิมพ์แห้งตัวเมื่อพิมพ์เป็น ชิ้นงาน โดยอาจทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีการเชื่อมโยงได้เร็วมากขึ้น ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อ ระยะเวลาในการเก็บรักษา
2. ในขั้นตอนการเตรียมหมึกพิมพ์ ควรใช้เครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการกระจาย RGO ในน้ำมันผสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alexander, K. and Shlomo, M. “Conductive Nanomaterials for Printed Electronics.” *Small*. 10 (2014) : 3515-3535.
- [2] Aline, M. and Patrick, V. **Water-based screen printing ink**. W.O patent no. 2003020835 A1. August 2002.
- [3] Kamysny, A. Steinke, J. and Magdassi, S. 2011. “Metal based inkjet inks for printed electronics.” *The Open Applied Physics*. 4 (2011) : 19–36.
- [4] Bhushan, H. P. 2015. “Formulation and Evaluation of Soy Polymer Based, Gravure Printed Resistive Inks for Applications in Printed Electronics.” Master's Thesis of Western Michigan University.
- [5] เรย์มอน, แซง. 2546. เคมี 1. แปลจาก **CHEMISTRY**. โดย นภดล ไชยคำ, พีรวรรณ พันธุมนาวิน และ ลัดดาวัลย์ ผดุงทรัพย์. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล.
- [6] Chris, P. Awadh, A. A. Sarah, J. P. Tim, C. and Davide, D. “The Effect of Graphite and Carbon Black Ratios on Conductive Ink Performance.” *Materials Science*. 52 (2017) : 9520-9530.
- [7] Ethan, B. S. Theodore, Z. G. Ahmad, E. I. Rahul, R. Shay, G. W. Jian, Z. Karl, W. P. Benji, M. and Mark, C. H. “Enhanced Conductivity, Adhesion, and Environmental Stability of Printed Graphene Inks with Nitrocellulose.” *Chemistry of Material*. 29 (2017) : 2332-2340.
- [8] Ana, C. A. J. Devin, M. Iain. M. Jonathan, R. and Alberto, S. “Materials and Applications for Large Area Electronics- Solution Based approaches.” *Chemical Reviews*. 110 (2010) : 3–24.
- [9] Jia, S. Bo, Z. and Howard, E. K. “Materials for Printable, Transparent, and Low-Voltage Transistors.” *Advanced Functional Materials*. 21 (2011) : 29-45.
- [10] Titkov, A. I. Bukhanets, O. G. Gadirov, R. M. Yukhin, Yu. M. and Lyakhov N. Z. “Conductive Inks for Inkjet Printing Based on Composition of Nanoparticles and Organic Silver Salt.” *Inorganic Materials: Applied Research*. 6 (2015) : 375–381.
- [11] Ethan, B. S. Pradyumna, L. P. Kanan, P. Michael, L. G. and Mark, C. H. “Inkjet Printing of High Conductivity, Flexible Graphene Patterns.” *Physical Chemistry Letter*. 4 (2013) : 1347–1351.
- [12] Veronika, H. Alexandra, P. Paul, D. F. Mike, K. Hiroyuki, F. and Kathy, R. “Graphene

- Inks for Printed Electronics.”, *Advances in Printing and Media Technology*,
Editors: Edlund N., Lovrecek M. 39 (2012) : 53-59.
- [13] Anke, K. 2010. **Carbon Materials and Nanotechnology**. Weinheim : WILEY-VCH.
- [14] Maheshwar, S. and Madhuri, S. 2010. **Carbon Nanoforms and Applications**. New York : McGraw-Hill.
- [15] Santosh, K. T. Vijay, K. Andrzej, H. Oraon, R. Adhikari ,A. D. and Nayak, G. C. “Magical Allotropes of Carbon: Prospects and Applications.” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 41 (2016) : 257-317.
- [16] ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ. 2560. “แกรฟีน วัสดุ 2 มิติ เพื่ออนาคต.” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*. (84) : 65-70.
- [17] H.-S. Philip, W. and Deri, A. 2011. **Carbon Nanotube and Graphene Device Physics**. New York : Cambridge University Press.
- [18] RAKHI A. 2017. **This is How Scotch Tape, a Couple of Geniuses and a Little Luck Led to a Noble Prize in Physics**. [Online]. Available : <https://www.indiatimes.com/lifestyle/self/this-is-how-scotch-tape-a-couple-of-geniuses-and-a-little-luck-led-to-a-noble-prize-in-physics-323247.html>.
- [19] Choi, W. and Lee, J.-W. 2012. **Graphene Synthesis and Applications**. Florida : CRC Press Taylor & Francis Group.
- [20] วิศณุสรุรงค์ ขาดีอารยะวดี. 2013. “แกรฟีน ตอนที่ 1 : การสังเคราะห์คาร์บอนรูปแบบใหม่.” *วารสารนเรศวรพะเยา*. 6 (1) : 10-24.
- [21] Zhang, y. Small, J.P. Pontius, W.V. and Kim, P. “Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices.” *Applied Physics Letters*. 86 (2005) : 073104.
- [22] Lu, X.K. Yu, M.F. Huang, H. and Ruoff, R.S. “Tailoring graphite with the goal of achieving single sheets.” *Nanotechnology*. 10 (1999) : 269-272.
- [23] Chun, K. C. and Martin, P. “Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint.” *Chemical Society Reviews*. 43 (2014) : 291-312.
- [24] ภัทรารุณ มนต์วิเศษ. 2560. “เอกสารประกอบการสอนวิชา พอลิเมอร์ชีวภาพ.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [25] Robert D.M. and Peter A.B. **Rumen Bypass Supplement**. U.S patent no. 6890548 B1. March 2003.
- [26] อิทธิพล แจ่มชัด. 2544. “เอกสารประกอบการสอน วิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] polymerdatabase.com. 2015. **ENR-Epoxyrenes Epoxidized Natural Rubber**. [Online]. Available : <http://polymerdatabase.com/Elastomers/ENR.html>.
- [28] เพลินพิศ บุชาธรรม. 2558. **CNR ยางธรรมชาติมูลค่าเพิ่มสูงชนิดใหม่**. [ออนไลน์]. Available : http://rubber.oie.go.th/rrd/file/presentationCNR_25_June_2015.pdf.
- [29] Hummers, W. and Offeman, R. "Preparation of Graphitic Oxide." *Journal of the American Chemical Society*. 80 (1958) : 1339-1339.
- [30] Chen, J. Yao, B. Li, C. and Shi, G. "An Improved Hummers Method for Eco-friendly Synthesis of Graphene Oxide." *Carbon*. 64 (2013) : 225-229.
- [31] Wanshuang, L. Rui, Z. Dan, Z. Guoqiang, D. Jie, M. S. Chee, Y. Y. and Xuehong, L. "Lignin-assisted Direct Exfoliation of Graphite to Graphene in Aqueous Media and Its Application in Polymer Composites." *Carbon*. 83 (2015) 188–197.
- [32] Nadia, A. Y. Nadia, G. K. Mohamed, A. A. and Nabel, A. N. "Preparation and Characterization of Polymeric Dispersants Based on Vegetable Oils for Printing Ink Application." *Progress in Organic Coatings*. 111 (2017) : 354–360.
- [33] Manisha, P. Aparna, K. Omprakash, Y. Viresh, T. and Kisan, K. "Biodegradable Bioepoxy Resins Based on Epoxidized Natural Oil (Cottonseed & Algae) Cured with Citric and Tartaric Acids Through solution Polymerization: A Renewable Approach." *Industrial Crops and Products*. 89 (2016) : 434–447.
- [34] Karmalm, P. Hjertberg, T. Jansso, n A. Dahl, R. and Ankner, K. "Network Formation by Epoxidised Soybean Oil in Plastisol Poly(vinyl chloride)." *Polymer Degradation and Stability*. 94 (2009) : 1986–1990.
- [35] พงศ์ยุทธ จันทอง, สุขปา เนตประดิษฐ์ และธนธร ทองสัมฤทธิ์. 2550. การผลิต และพัฒนาหมึกพิมพ์สกรีนที่มีตัวทำละลายฐานน้ำมันถั่วเหลืองเพื่อสิ่งแวดล้อม. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [36] Oyman, Z., Ming, W. and Linde, R. "Oxidation of Drying Oils Containing Non-conjugated and Conjugated Double Bonds Catalyzed by a Cobalt Catalyst." *Progress in Organic Coatings*. 54 (2005). : 198-204.
- [37] ธันย์จิรา บัวนุช, วิศวกรรณ อยู่เจริญ และวิลาสินี ราชีกฤษ. 2559. การพัฒนาหมึกพิมพ์เอทิงฐานน้ำมันสำหรับภาพพิมพ์. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [38] ASTM D 3359 Committee on standard. "Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test 2017."

- [39] Andrijanto, E. Shoelarta, S. Subiyanto, G. and Rifki, S. 2015. "Facile Synthesis of Graphene from Graphite Using Ascorbic Acid as Reducing Agent." 020003-1 - 020003-4. in **The 3rd International Conference on Advanced Materials Science and Technology (ICAMST 2015)**. Semarang : The Grasia Hotel.
- [40] Rathnayake, R.M.N.M. Wijayasinghe, H.W.M.A.C. Pitawala, H.M.T.G.A. Yoshimurac, M. and Huang, H. H. "Synthesis of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide by Needle Platy Natural Vein Graphite." *Applied Surface Science*. 393 (2017): 309–315.
- [41] Abdolhosseinzadeh, S. Asgharzadeh, H. and Kim, H. S. "Fast and Fully-scalable Synthesis of Reduced Graphene Oxide." *Scientific Reports*. 5 (2015): 10160.
- [42] Hof, F. Kampioti, K., Huang, K., Jaillet, C., Derré, A., Poulin, P., Yusof, H. White, T. Koziol, K. Paukner, C. and Pénicaud, A. "Conductive Inks of Graphitic Nanoparticles From a Sustainable Carbon Feedstock." *Carbon*. 111 (2017): 142-149.
- [43] Li, J. Zhang, H. Gao, M. Li, Q. Bian, W. Tao, T. and Zhang, H. "High-Temperature Wettability and Interactions between Y-Containing Ni-Based Alloys and Various Oxide Ceramics." *Materials*. 11 (2018): 749.
- [44] Dezellus, O. and Eustathopoulos, N. "Fundamental Issues of Reactive Wetting by Liquid Metals." *Journal of Materials Science*. 45 (2010): 4256-4264.
- [45] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2558. ภาวะการเปียก. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%B0%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%81>
- [46] Loryuenyong, V. Totepvimarn, K. Eimburanaprat, P. Boonchompoo, W. and Buasri, A. " Preparation and Characterization of Reduced Graphene Oxide Sheets via Water-Based Exfoliation and Reduction Methods." *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013 (2013).
- [47] Badri, M.A.S. Salleh, M.M. Noor, N.F.A.M. Rahman, M.Y.A. and Umar, A.A.. "Green Synthesis of Few-layered Graphene from Aqueous Processed Graphite Exfoliation for Graphene Thin Film Preparation." *Materials Chemistry and Physics*. 193(2017). 212-219.
- [48] Lee, J. and Lee, B. "A Simple Method to Determine the Surface Energy of Graphite." *Carbon Letters*. 21 (2017): 107-110.

- [49] Adnan, A. Ahsan, R. Khalid, R. Nauman, M. Malik, M. Arshad, K. Ko, J.B. Saleem, K. Yang, B.S. Kim, H.C. Doh, Y.H. Kim, D.S. and Choi, K.H. “Printed Patterns Adhesion dependency on Contact Angle of Ink on Substrate.” *International Journal of Engineering & Technology*. 10(01) (2010) : 72-75.
- [50] เจริญชัย เหลืองอ่อน. 2554. “การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ* (62) : 74-79.
- [51] Miccoli, I. Edler, F. Pfnür, H. and Tegenkamp, C. “The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems.” *Physics: Condensed Matter*. 27(22) (2015) : 223201.
- [52] Paul, F. 2002. “EECS 143 Microfabrication Technology.” Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, Berkeley University of California.

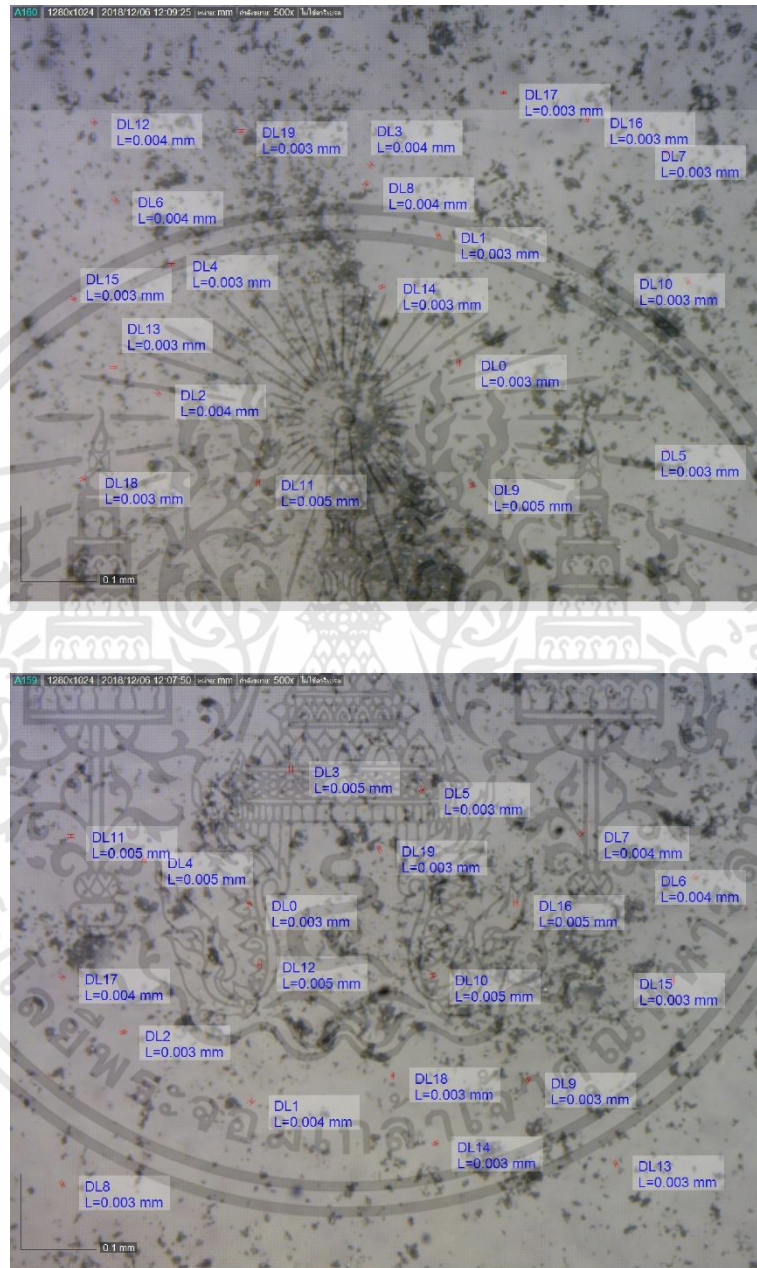




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

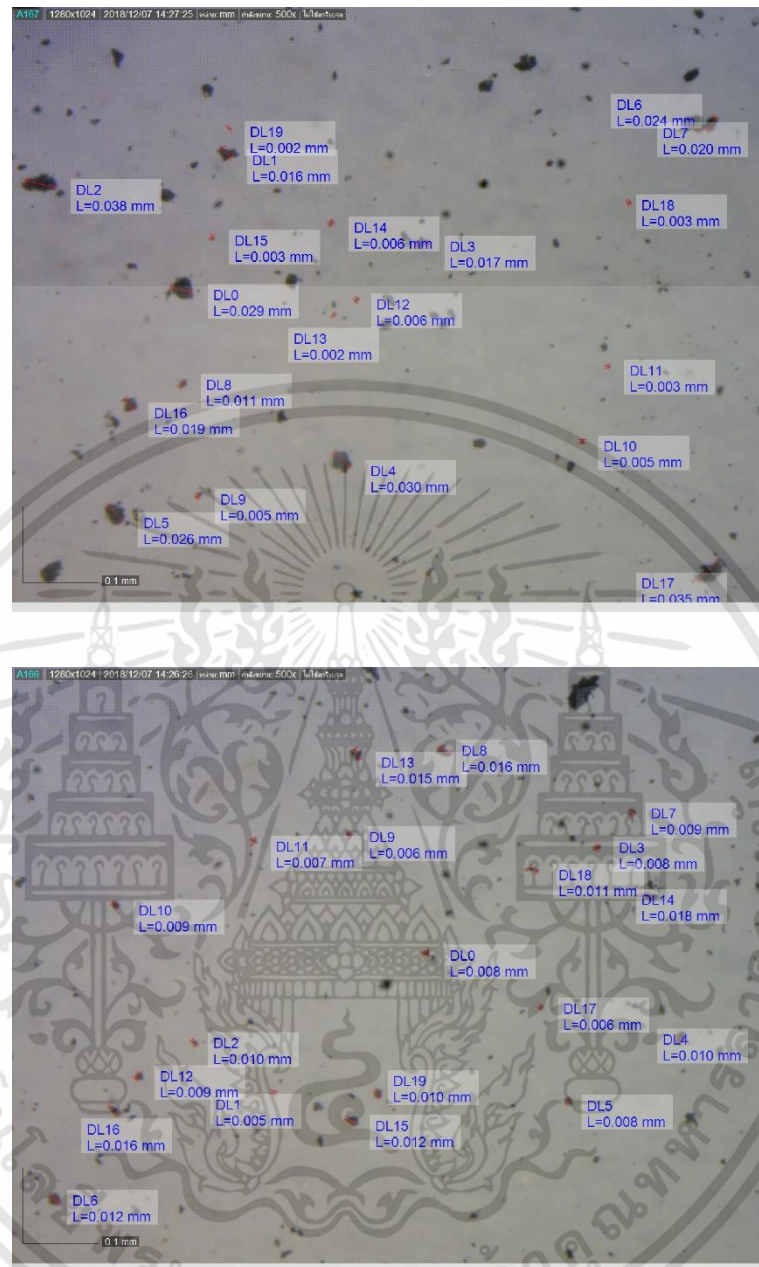
ภาคผนวก ก

อนุภาคคาร์บอนนำไฟฟ้า



รูปที่ ก 1 รูปถ่ายอนุภาคแกรไฟต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 500 เท่า

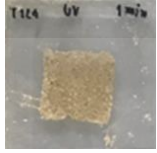
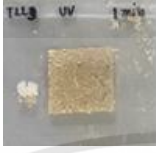


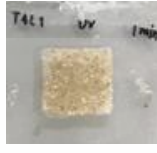
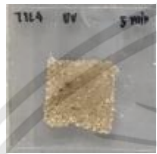

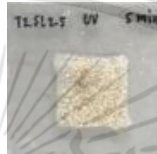
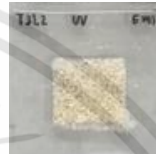


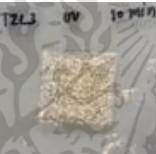

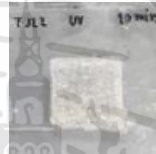
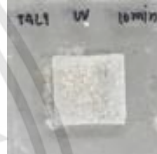

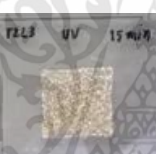

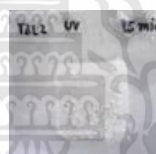
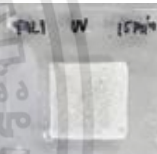

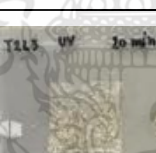
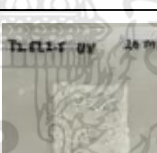
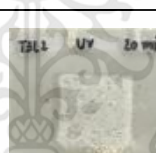
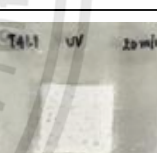
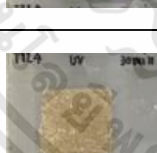
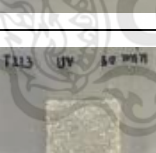
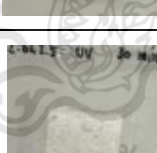
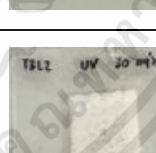
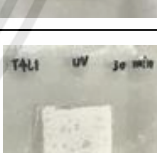

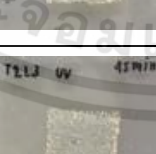
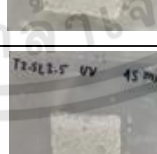
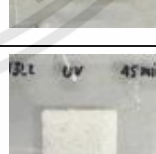
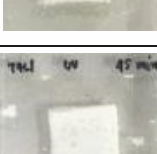

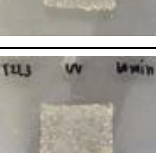

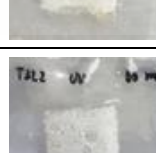
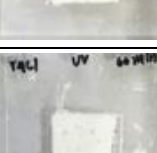
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก 2 รูปถ่ายอนุภาคคาร์บอนไฟเบอร์ที่ฉายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 500 เท่า

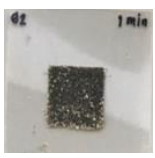
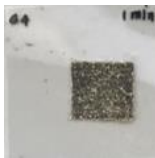
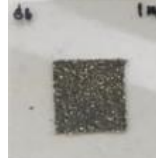

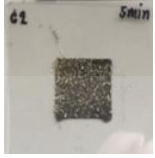
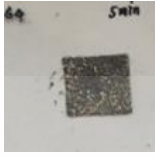
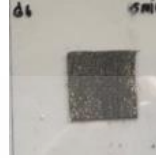



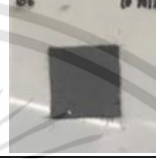
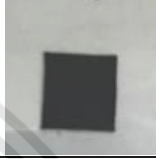




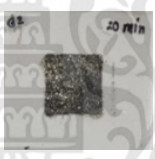
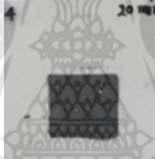






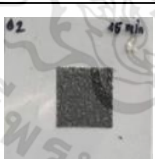
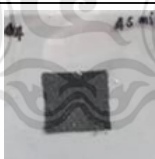
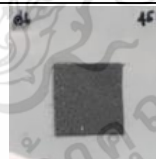

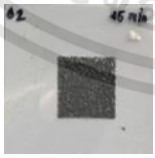
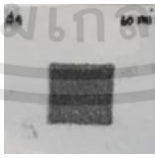
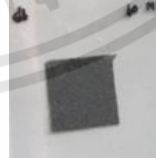

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การทดสอบการแห้งผิว

เวลา	T1L4	T2L3	T1L1	T3L2	T4L1
1 นาที					
5 นาที					
10 นาที					
15 นาที					
20 นาที					
30 นาที					
45 นาที					
60 นาที					

รูปที่ ข 1 ชิ้นงานน้ำมันผสมสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบการแห้งที่ผิว เมื่อได้รับรังสี UV ที่เวลาแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	T1L1G2	T1L1G4	T1L1G6	T1L1G8
1 นาที				
5 นาที				
10 นาที				
15 นาที				
20 นาที				
30 นาที				
45 นาที				
60 นาที				

รูปที่ ข 2 ชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบการแห้งที่ผิว เมื่อได้รับรังสี UV ที่เวลาแตกต่างกัน

ภาคผนวก ค

ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัดสี่จุด

ตารางที่ ค 1 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G6 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชั้นงานต่างกัน

Applied current (μA)	10	12	15	20	25	
Voltage(mV)	4.9	5.9	7.9	10.4	13.2	
	ชั้นที่ 1	6.1	7.2	9.2	12.1	15.1
		4.7	5.5	7.1	9.6	11.7
	ชั้นที่ 2	3.7	4.5	4.9	7.1	9.4
		4.2	4.9	6.3	8.3	10.4
		3.1	3.8	6.4	6.3	7.8
ชั้นที่ 3	4.3	5.0	6.7	9.1	11.4	
	5.7	6.9	7.5	11.5	14.7	
เฉลี่ย	4.9	5.8778	7.4667	9.9444	12.5333	
sd	1.3181	1.6551	1.8351	2.7102	3.4205	

ตารางที่ ค 2 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G8 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชั้นงานต่างกัน

Applied current (μA)	10	12	15	20	25	
Voltage(mV)	3.9	4.5	5.9	8	10	
	ชั้นที่ 1	6.0	6.9	9.2	12.2	15.3
		7.0	8.4	10.8	16.1	18.9
	ชั้นที่ 2	3.3	4.1	5.4	7.2	9.0
		4.0	5.1	5.2	8.2	10.4
		3.2	3.9	4.8	6.6	8.5
ชั้นที่ 3	2.3	2.7	3.5	4.6	5.9	
	2.5	2.9	3.9	5.2	6.6	
เฉลี่ย	3.8111	4.5556	5.7333	8.0556	10.0111	
sd	1.6796	1.9881	2.6306	3.8442	4.4627	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 3 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G7.5R0.5 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน
ต่างกัน

Applied current (μA)		10	12	15	20	25
Voltage(mV)	ชั้นที่ 1	2.8	4.0	5.2	6.5	8.1
		3.1	4.1	4.6	6.2	7.8
		2.9	3.6	5.6	7.6	9.6
	ชั้นที่ 2	2.6	4.1	5.1	6.7	8.4
		2.9	4.4	5.6	7.4	9.3
		3.5	3.4	4.2	5.7	7
	ชั้นที่ 3	2.9	3.4	4.4	6	7.5
		3.2	4.7	5.8	7.8	9.9
		3.5	3.9	5.1	7	8.4
	เฉลี่ย	3.0444	3.9556	5.0667	6.7667	8.4444
	sd	0.3087	0.4391	0.5635	0.7365	0.9812

ตารางที่ ค 4 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G7.0R1.0 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน
ต่างกัน

Applied current (μA)		10	12	15	20	25
Voltage(mV)	ชั้นที่ 1	3.8	4.6	5.7	7.4	8.8
		3.1	3.6	4.6	6.0	9.3
		3.5	4.2	5.3	7.2	7.6
	ชั้นที่ 2	2.7	3.2	4	5.5	7.8
		2.9	3.5	4.3	5.7	7.1
		2.9	3.4	4.3	5.8	7.2
	ชั้นที่ 3	2.4	2.8	3.5	4.7	5.9
		2.3	2.8	3.5	4.8	6.0
		2.9	3.4	4.2	5.6	7.0
	เฉลี่ย	2.9444	3.5	4.3778	5.8556	7.4111
	sd	0.4799	0.5916	0.7396	0.9275	1.1330

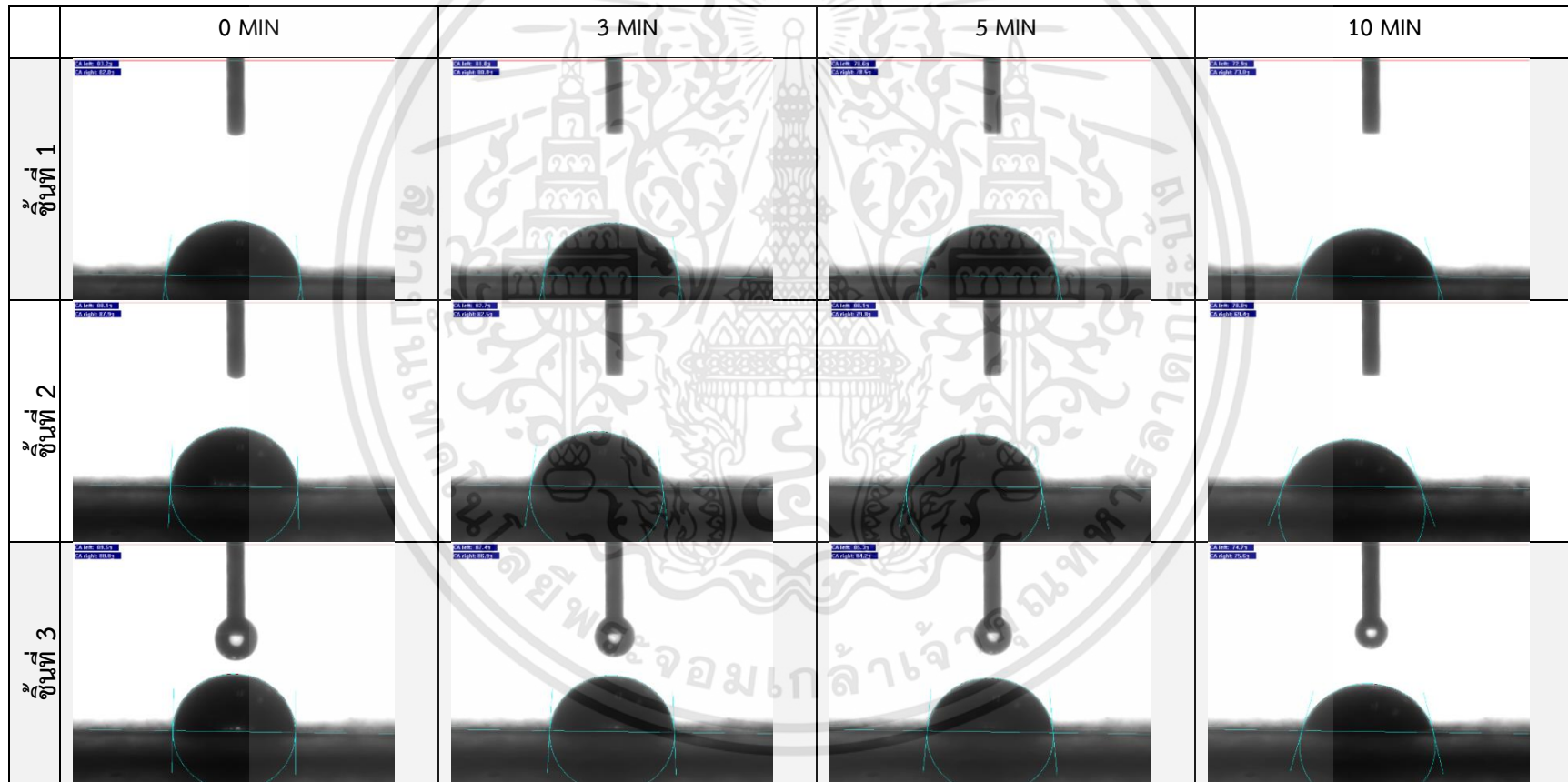
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 5 ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ของสูตร T1L1G6.0R2.0 ที่กระแสไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน
ต่างกัน

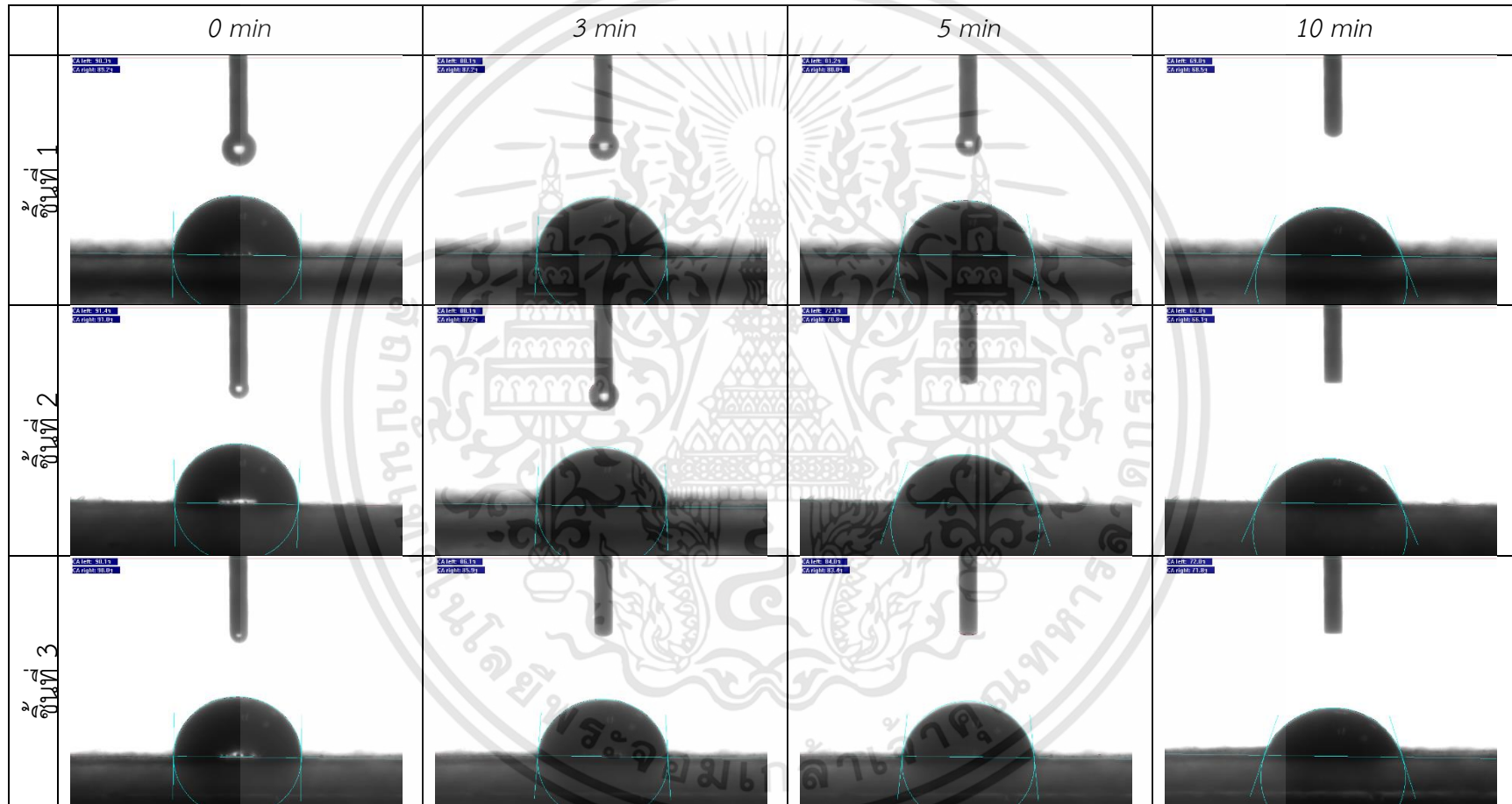
Applied current (μA)	10	12	15	20	25	
Voltage(mV)	ชั้นที่ 1	4.5	5.5	6.2	7.8	9.4
		3.6	4.4	4.8	4.3	6.1
		3.5	4	4.4	5.5	6.8
	ชั้นที่ 2	3	4.1	4.7	5.5	7.2
		4.2	4.4	6.2	7	7.1
		3.7	4.6	5.7	5.8	7.8
	ชั้นที่ 3	4.8	7.4	8	8.8	9.6
		4.6	4.6	7	8.5	12
		3	5.2	6.2	6.4	7.7
เฉลี่ย	3.877778	4.911111	5.911111	6.622222	8.188889	
sd	0.675977	1.050529	1.163448	1.51804	1.831287	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

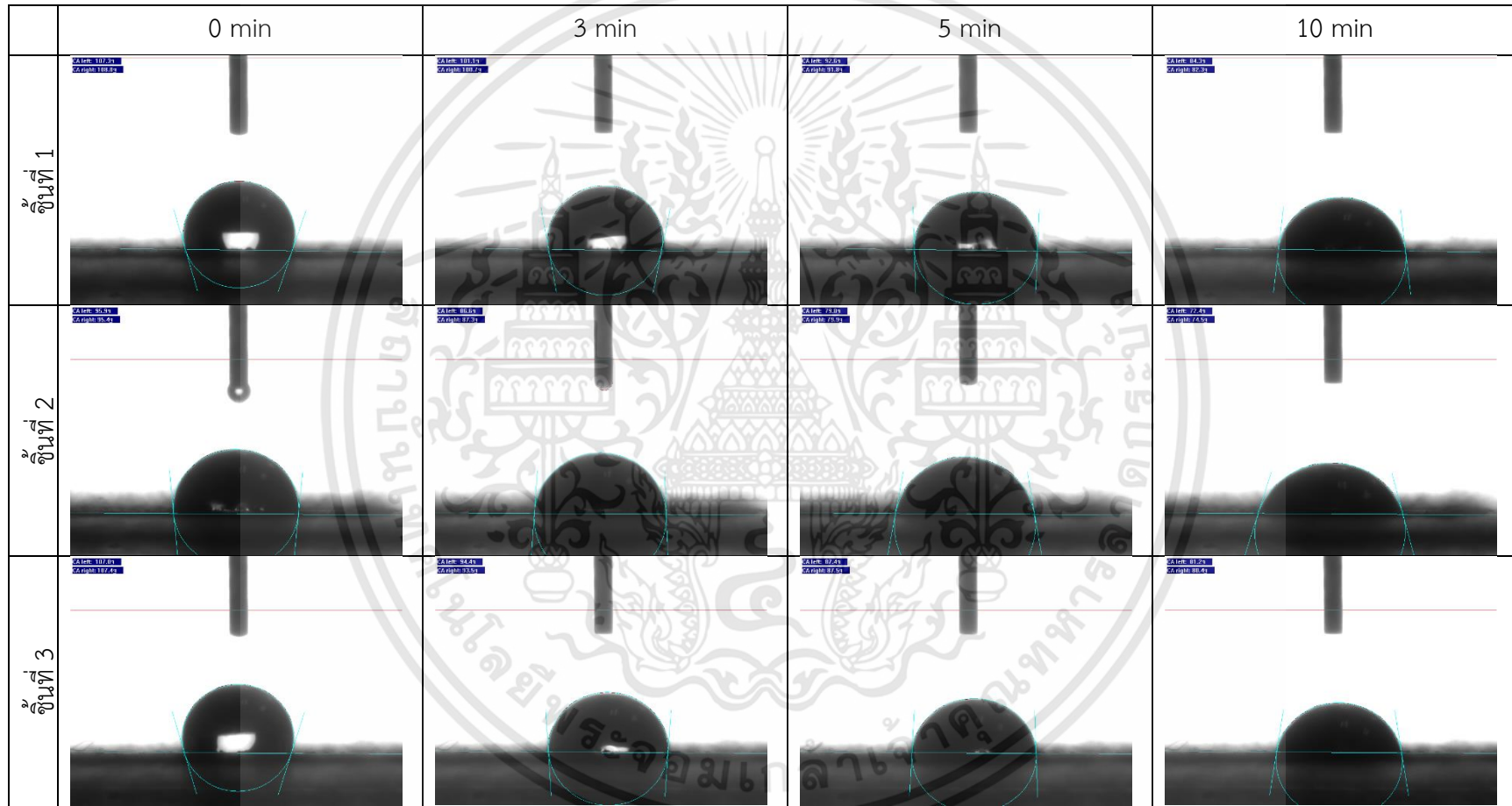
ภาคผนวก ง
การทดสอบมุมสัมผัส



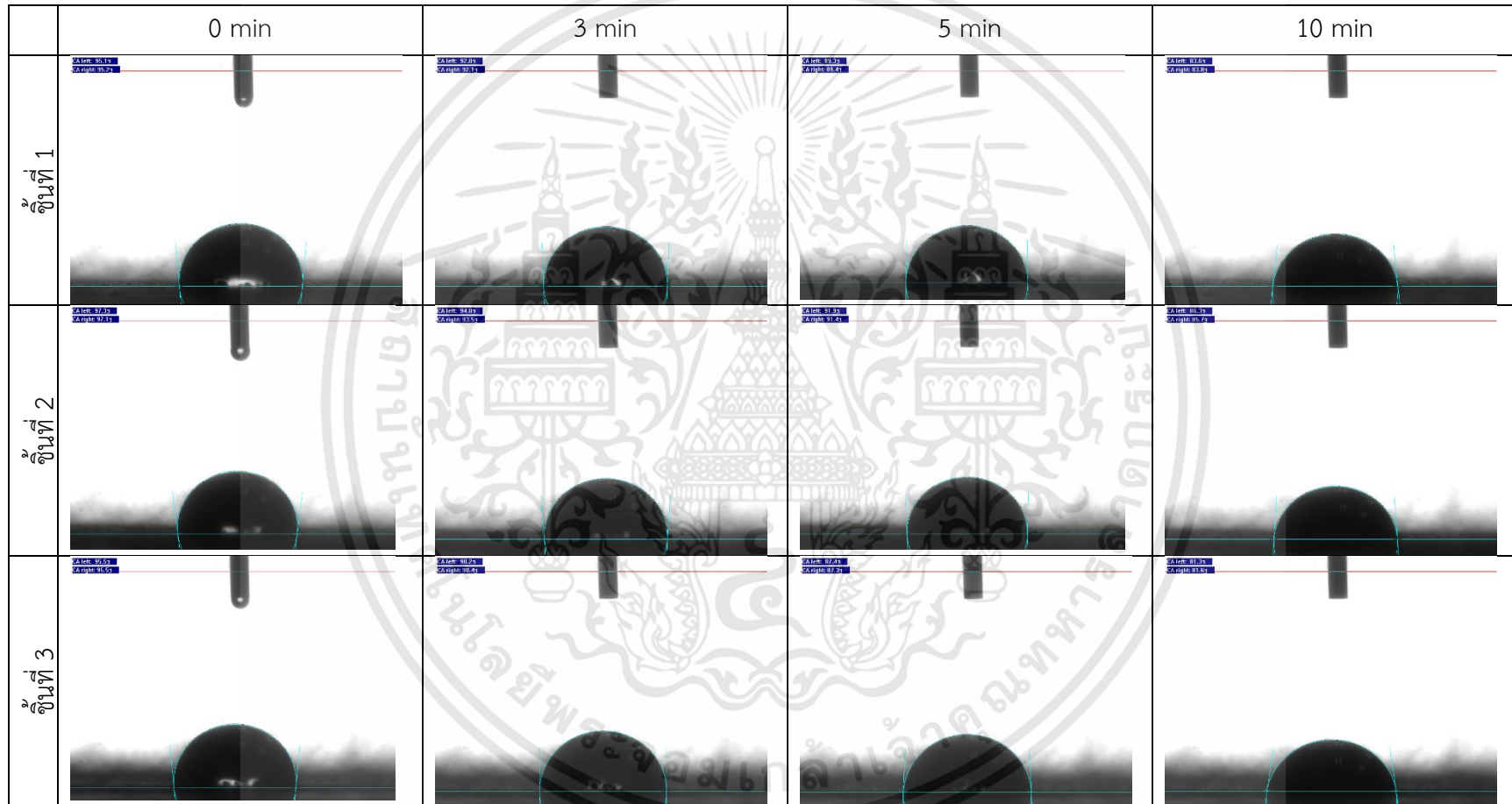
รูปที่ ง 1 ภาพหยดน้ำบนชั้นงานสูตร T1L1G8 จากชั้นงาน 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ ง 2 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G7.5R0.5 จากชิ้นงาน 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 3 ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G7.0R1.0 จากชิ้นงาน 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ ๔ ภาพหยดน้ำบนชิ้นงานสูตร T1L1G6.0R2.0 จากชิ้นงาน 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานหมึกพิมพ์นำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ

สูตร	ชั้นที่	มุมสัมผัส (องศา)			
		0min	3min	5min	10min
T1L1G8	1	83.2	81.0	78.6	72.9
	2	88.1	82.7	80.1	70.0
	3	89.5	87.4	85.3	74.7
	เฉลี่ย	86.9	83.7	81.3	72.5
	sd	3.3	3.3	3.5	2.4
T1L1G7.5R0.5	1	90.3	88.1	81.2	69.1
	2	91.4	73.9	72.1	66.8
	3	90.1	86.1	84.0	72.0
	เฉลี่ย	90.6	82.7	79.1	69.3
	sd	0.7	7.7	6.2	2.6
T1L1G7.0R1.0	1	107.3	101.1	92.6	84.3
	2	95.9	86.6	79.8	72.4
	3	107.0	94.4	87.4	81.2
	เฉลี่ย	103.4	94.0	86.6	78.3
	sd	6.5	7.2	6.4	6.2
T1L1G6.0R2.0	1	95.1	92.00	89.3	83.6
	2	97.3	94.0	91.9	86.3
	3	95.5	90.2	87.4	81.3
	เฉลี่ย	96.0	92.1	89.5	83.7
	sd	1.2	1.9	2.3	2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล
วัน เดือน ปีเกิด	28 เมษายน 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	2/492 หมู่ที่ 1 ถนนสุขุมวิท ตำบลบางเมืองใหม่ อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา เคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.03 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2562 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา เทคโนโลยีพอลิเมอร์ เกรดเฉลี่ย 3.50 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. ธนวรรณ ภัทรสัตยากร, ภิญญลักษณ์ วิเศษรักสกุล และอานนท์ ช่างโชติ. 2558. “การปรับปรุงดินสอพองด้วย PVA/กัมอาระบิค/แป้งดัดแปร สำหรับวัสดุรองพื้นในงานสีฝุ่น.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2. Wisetraksakun, P. and Monvisade, P. 2018. “PREPARATION OF CONDUCTIVE INKS FROM EPOXIDIZED SOYBEAN OIL AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER CONTAINING CONDUCTIVE CARBONS.” The proceeding of The 8 th International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (ITICHe 2018). Pattaya: 179-184.