



การอัพไซเคิลแผ่นฟิล์มพลาสติกในโรงงานที่ใช้แล้ว
เป็นเซ็นเซอร์ความชื้นอัจฉริยะที่สวมใส่ได้

Upcycling of the Used-Factory Plastic Film Sheets
to A Wearable Smart Moisture Sensor

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กาญจนา ลือพงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลิศลักษณ์ แก้ววิมล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณเงินรายได้ ปี พ.ศ. 2565

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

การอัดไซเคิลแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ใช้แล้วจากโรงงานให้กลายเป็นเซ็นเซอร์วัดความชื้นอัจฉริยะที่สวมใส่ได้มีจุดประสงค์หลักเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับขยะแผ่นพลาสติกจากอุตสาหกรรมและลดต้นทุนการจัดขยะพลาสติก โดยพัฒนาเป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่มีความสามารถในการตรวจจับความชื้น โดยเริ่มจากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและเคมีของแผ่นพลาสติก จากนั้นนำแผ่นพลาสติกไปเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v และศึกษาสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทั้งในด้านการตอบสนองทางไฟฟ้าโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี สัณฐานวิทยาพื้นผิวเฉพาะในการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ และสุดท้ายนำไปหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์สำหรับการตรวจจับความชื้นสัมพัทธ์

ผลการศึกษาพบว่าแผ่นฟิล์มพลาสติกจากโรงงานเป็นพลาสติกประเภทพอลิไธไมด์เมทิลไซลอกเซนมีความหนา 0.105 มิลลิเมตร มีความยืดหยุ่น สามารถปรับแต่งพื้นผิวได้ สามารถสกรีนเลเซอร์และเคลือบกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0%w/v เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าสำหรับการพัฒนาเป็นแผ่นกราฟีนอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบวงกลมในการวัดความชื้นจากบรรยากาศได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์ ตามสมการพหุนามกำลังสองคือ $y = -0.0009x^2 + 0.545x + 18.005$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9707$ อนุภาคราฟีนออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นพลาสติกจะมีรูปทรงเป็นหกเหลี่ยมซ้อนชิดติดกัน และมีพื้นที่ผิวเฉพาะ 74.6269 ตารางเมตรต่อกรัม

คำสำคัญ: อัดไซเคิล, กราฟีนอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์, เซนเซอร์, กราฟีนออกไซด์, ความชื้นสัมพัทธ์

ABSTRACT

Upcycling of the used-factory plastic film sheets into a wearable smart moisture sensor primarily aims to add value to plastic sheet waste from industrial and reduce the disposal of plastic waste cost. The circle graphene electrode sensor was developed for the humidity sensor. Firstly, the plastic sheet was examined by physical and chemical properties, then coated with graphene oxide at 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0%w/v for electricity response study of the modified electrodes by cyclic voltammetry method. Addition, the LCR meter was used for humidity measuring by the electric method. Finally, the circle graphene electrode sensor examined the morphology and calculated the specific area of graphene oxide.

The results showed the plastic sheet waste is Polydimethylsiloxane type with 0.105 mm thickness. It was a flexible and modified surface and suitable for laser screening. The circle graphene electrode sensor was developed by coating with 1.0%w/v to enhance conductivity properties. Then, circle graphene electrode sensor were available for humidity measuring by the relationship of humidity and electric capacity corresponding with the 2 power of polynomial equation; $y = -0.0009x^2 + 0.545x + 18.005$, $R^2 = 0.9707$. The morphology of the graphene-modified electrode surface was stacked in a hexagonal shape. The surface area of graphene oxide was calculated as 74.6269 square meters per gram.

Keyword: Upcycle, Graphene electrode, Sensor, Relative humidity

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการอัปเดตเซลล์แผ่นฟิล์มพลาสติกในโรงงานที่ใช้แล้วเป็นเซ็นเซอร์ความชื้น
อัจฉริยะที่สวมใส่ได้สำเร็จไปด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนวัตถุดิบประเภทพลาสติกจาก บริษัท
ไฮ-เทค แอปพารেল เพื่อนำมาวิจัยเป็นเซ็นเซอร์ความชื้น และงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ทางคณะวิจัยจึงขอขอบคุณหน่วยงานทั้งสองเป็นอย่างสูง

คณะวิจัย

กาญจนา ลือพงษ์

เลิศลักษณ์ แก้ววิมล

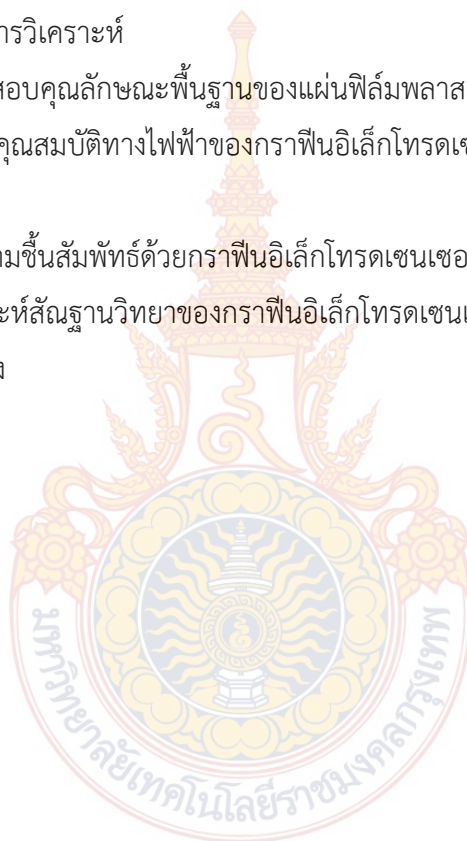


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ข
ABSTRACT	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทสรุปผู้บริหาร	1
1.2 หลักการและเหตุผล	2
1.3 คำถามการวิจัยและวัตถุประสงค์	4
1.4 กรอบการวิจัย	4
1.5 เป้าหมาย หรือผลผลิตหรือสำเร็จของโครงการวิจัย	5
1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
1.7 ผลผลิต ผลลัพธ์ และผลกระทบจากงานวิจัยที่สอดคล้องกับ OKR	5
1.8 แนวทางการขับเคลื่อนผลงานวิจัยและนวัตกรรม	6
1.9 ประโยชน์ที่ได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 กระบวนการอ็อปไซเคิล	7
2.2 เซนเซอร์	8
2.3 การสร้างเซนเซอร์ด้วยเลเซอร์โดยตรง	10
2.4 กราฟีนที่เหนียวนำด้วยเลเซอร์	13
2.5 ความชื้น	17
2.6 โซลิกโวลแทมเมตรี	19
2.7 พลาสติก	21
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	25
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	25
3.2 การดำเนินการทดลอง	26
บทที่ 4 ผลการวิจัย และการวิเคราะห์	32
4.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะพื้นฐานของแผ่นฟิล์มพลาสติก	32
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบ	34
วงกลม	
4.3 ผลการวัดความชื้นสัมพัทธ์ด้วยกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม	35
4.4 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	39
บรรณานุกรม	40



สารบัญรูป

	หน้า
1.1 กรอบการวิจัย	4
2.1 ลักษณะการทำงานของไบโอเซนเซอร์	10
2.2 การเขียนกราฟโดยตรง	11
2.3 การเขียนเลเซอร์โดยตรงบนกราฟิโนอิเล็กทรอนิกส์	12
2.4 การใช้กราฟิโนเหนี่ยวนำด้วยเลเซอร์	14
2.5 รูปแบบการผลิต LIG และคุณลักษณะที่ได้	16
2.6 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้จากวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี	20
3.1 กราฟิโนอิเล็กทรอนิกส์แบบวงกลม	27
3.2 สารละลายเฟอริ-เฟอโร พอสเฟตบัพเฟอร์	27
3.3 การเชื่อมต่อแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ตัดแปลงกับขั้วไฟฟ้าในสารละลายเฟอริ-เฟอโร พอสเฟต	30
4.1 การวัดความหนาแน่นฟิล์มพลาสติก	32
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์มพลาสติก	33
4.3 การเทียบหมู่ฟังก์ชันกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน	33
4.4 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของกราฟิโนอิเล็กทรอนิกส์แบบวงกลม	34
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความชื้น	37
4.6 การวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ตัดแปลงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด	38

สารบัญตาราง

	หน้า
3.1 ปริมาณการเตรียมสารละลายเกลืออัมมัว	29
3.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า	30
4.1 ความจุไฟฟ้าจากการวัดด้วย LCR meter ที่ความถี่ต่าง ๆ	36



บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยเรื่องการอัปเดตฟิล์มพลาสติกในโรงงานที่ใช้แล้วเป็นเซ็นเซอร์ความชื้นอัจฉริยะที่สวมใส่ได้ เป็นโครงการวิจัยที่อยู่ในแพลตฟอร์ม 2 (Platform 2) ด้านการวิจัยและสร้างนวัตกรรมเพื่อตอบโจทย์ท้าทายสังคม โปรแกรมโจทย์ท้าทายด้านทรัพยากร สิ่งแวดล้อม และการเกษตร (โปรแกรม P7) มีแผนงานด้านการจัดการขยะเป็นศูนย์ (Zero waste) ภายใต้แผนงานหลักด้านทุนท้าทายด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการใช้ความรู้การวิจัยและนวัตกรรม เพื่อจัดการปัญหาท้าทายเร่งด่วนสำคัญของประเทศในด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การเกษตร และบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยมีผลลัพธ์ที่สำคัญในการลดขยะครัวเรือน และขยะอุตสาหกรรมร้อยละ 10 ต่อปี และเพิ่มอัตราการนำขยะจากทุกกระบวนการกลับมาใช้ร้อยละ 10 ต่อปี

งานวิจัยนี้มีการดำเนินการตามมาตรฐานการวิจัยโดยไม่มีการใช้สัตว์ทดลอง ไม่มีการวิจัยในมนุษย์ ไม่เป็นการวิจัยเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยทางชีวภาพ และไม่มีการการใช้ห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี ทั้งนี้การวิจัยนี้มีความร่วมมือกับภาคเอกชนคือ บริษัทไฮ-เทค แอปพาวเรล จำกัด ในการวางแผนคิดในการพัฒนา และจัดการขยะพลาสติกรวมกัน โดยการสนับสนุนในรูปแบบวัสดุดิบ (In-kind) สำหรับการศึกษาทดลอง เมื่อพิจารณาระดับความพร้อมที่มีอยู่ในปัจจุบันและศักยภาพองค์ความรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่จะพัฒนา พบว่าก่อนเริ่มดำเนินการวิจัย งานวิจัยนี้อยู่ในระดับความพร้อมทางเทคโนโลยี (Technology readiness level: TRL) ระดับ 1 (TRL1; Basic principles observed and reported) คือมีการสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซ็นเซอร์ และพัฒนาขึ้นเป็นระดับ 4 (TRL 4; Key elements demonstrated in laboratory environments) เมื่องานวิจัยแล้วเสร็จ โดยจะได้ผลิตภัณฑ์ประเภทเซ็นเซอร์แบบสวมใส่ได้ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ และเมื่อพิจารณาความพร้อมทางสังคม (Societal readiness level: SRL) ก่อนการวิจัยจะมีความพร้อมทางสังคมในระดับ 1 (SRL 1; identifying problem and identifying societal readiness) กล่าวคือมีการวิเคราะห์ปัญหาด้านขยะพลาสติกรวมกับสถานประกอบการในการกำหนดเทคโนโลยีและนวัตกรรมในการแก้ไขปัญหาารวมกัน และพัฒนาเป็นระดับ 4 (SRL 4 ; Problem validated through pilot testing in relevant environment to

substantiate proposed impact and societal readiness) เมื่อเสร็จสิ้นการวิจัย โดยสามารถพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์และทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการพัฒนาร่วมกันกับทางภาคเอกชน

1.2 หลักการและเหตุผล

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ประเภทพอลิเมอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาว มีบทบาทและความเกี่ยวข้องกับมนุษย์ในรูปแบบผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น แปรงสีฟัน ถังมือ ถังเท้า อุปกรณ์สำนักงานและเสื้อผ้าสำหรับสวมใส่ในกิจกรรมต่าง ๆ เป็นต้น พลาสติกหรือพอลิเมอร์เหล่านี้มีคุณสมบัติที่เบาสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากมาย แต่พลาสติกเป็นวัสดุที่ย่อยสลายยาก ต้องใช้ต้นทุนในการกำจัดค่อนข้างสูง วิธีการกำจัดได้แก่การฝังกลบ วิธีการนี้ต้องใช้พื้นที่มาก และส่งผลต่อคุณภาพดิน และน้ำในบริเวณนั้น ส่วนอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำคือการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและใช้พื้นที่น้อย แต่สามารถเกิดเป็นมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และการแตกตัวของพอลิเมอร์เป็นอนุภาคขนาดเล็กได้ ซึ่งปัญหาที่เกิดจากการกำจัดพลาสติกนี้ส่งผลกระทบต่อปัญหาโลกร้อนซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก เห็นได้ว่าปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตโดยรวมของประชากร ในปัจจุบันพบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับขยะพลาสติกในไทยเริ่มหนักขึ้นและกำลังเข้าสู่ขั้นวิกฤต โดยหนึ่งในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับขยะพลาสติกก็คือโรงงานสิ่งทอที่มีการใช้วัสดุประเภทพลาสติกในรูปแบบของเส้นใยสังเคราะห์ พลาสติก เช่น บริษัทไฮ-เทค แอปพารเอล จำกัดเป็นบริษัทผู้ผลิตเสื้อผ้าและมีการพิมพ์แบบลอกลายทำให้เกิดปัญหาแผ่นฟิล์มพลาสติกเหลือทิ้งจากโรงงานจำนวนมากกว่า 1 ตัน/ปี ขยะพลาสติกเหล่านี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจ้างบริษัทเข้ามาจัดการขยะปีละมากกว่า 100,000 บาท (จากการสัมภาษณ์บริษัทไฮ-เทค แอปพารเอล จำกัด, 2021) ในขณะที่แผ่นพลาสติกเหล่านี้นำไปขายได้ราคาเพียง 5 บาท/กิโลกรัม [1]

แผ่นฟิล์มพลาสติกเหล่านี้มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ชุ่ม และสามารถยืดหยุ่นได้ดีมีความเหมาะสมในการนำมาพัฒนาเป็นเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำมาสวมใส่ได้ (Wearable electronic devices) ด้วยวิธีการพิมพ์โดยใช้เลเซอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนของโลหะ เช่น กราฟีน เป็นสื่อไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการผลิตเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดความชื้น เนื่องจากความชื้นเป็นตัวแปรหนึ่งที่บ่งบอกได้ถึงสุขภาพของมนุษย์ เช่น ระดับความชื้นที่เกิดจากกระบวนการหายใจสามารถบ่งบอกถึงสุขภาพ และระบบเผาผลาญในร่างกายได้เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการเต้นของหัวใจ เซนเซอร์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ด้านกีฬา เซนเซอร์ชีวภาพ และเครื่องมือตรวจสุขภาพแบบพกพาได้ อุปกรณ์เหล่านี้สามารถติดลงบนเสื้อผ้าหรือผิวหนังเพื่อช่วยในการตรวจวัดสุขภาพของบุคคล และข้อมูลทางชีวภาพต่าง ๆ จัดเป็นอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสุขภาพ (Electronic healthcare) ที่สามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว และมีความ

ต้องการเป็นอย่างมากตอบสนองกับการเปลี่ยนผ่านประเทศไทยเข้าสู่สังคมแห่งเทคโนโลยี ด้วยวิถีชีวิตที่เรียกว่าการใช้ชีวิตแบบอัจฉริยะ (Smart life) เพื่อส่งเสริมคุณภาพชีวิตที่ดีของประชาชนต่อไป

ในปัจจุบันการดูแลสุขภาพเป็นที่นิยมอย่างมากสำหรับบุคคลทั่วไป ซึ่งทำให้เกิดเทคโนโลยีเซนเซอร์ที่สามารถสวมใส่ได้ และสะดวกต่อการใช้งาน เช่น เซอร์ที่สวมใส่ได้มีแบบที่สามารถยึดติดกับส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เพื่อจับพารามิเตอร์ทางชีวเคมี และสรีรวิทยา และยังมีแบบอุปกรณ์เพื่อเพิ่มความสะดวกสบาย ผู้คนสามารถใช้เซนเซอร์ที่สวมใส่ได้เพื่อติดตามสัญญาณชีพพื้นฐานของร่างกายมนุษย์ เช่น อุณหภูมิของร่างกาย อัตราการหายใจ ความดันโลหิต อัตราชีพจร และระดับกลูโคส เซนเซอร์ที่สวมใส่ได้กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในด้านการแพทย์ และทางชีววิทยาสำหรับศักยภาพในการจัดหาเครื่องมือวินิจฉัย เซนเซอร์เหล่านี้มาแทนที่ส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่สามารถติดตั้งได้ในโรงพยาบาลเท่านั้น และกลายเป็นตัวเลือกใหม่ในการประเมินสุขภาพของมนุษย์ [2] ปัจจุบันการพัฒนาเซนเซอร์สามารถนำไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารโดยตรงหรือใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารตามหลักการวิเคราะห์ทางอ้อมได้ การตรวจวัดด้วยเซนเซอร์มีศักยภาพ และประสิทธิภาพในการทำงานค่อนข้างสูง สามารถใช้ทดแทนวิธีวิเคราะห์แบบดั้งเดิม หรือแบบวิเคราะห์ที่ต้องใช้เครื่องมือราคาแพง และต้องการผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ สามารถลดต้นทุน และมีความแม่นยำที่ค่อนข้างชัดเจน ปัจจุบันมีงานวิจัยหลากหลายสาขาที่พัฒนาเซนเซอร์โดยทำการพัฒนาสารชีวภาพ และทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้ได้เซนเซอร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ และตอบสนองด้วยความเร็วสูง มีขนาดเล็กพกพาได้สะดวก [3] นอกจากนี้ยังมีการผลิตเซนเซอร์วัดความชื้นที่นิยมใช้วัสดุพอลิเมอร์ในการผลิต เช่น ไบโอสเซนเซอร์ เซนเซอร์ความชื้น และเซนเซอร์ก๊าซ เนื่องจากอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรความสูงของฟิล์มส่งผลให้มีความไวที่ดี และมีความเสถียรที่แน่นอนมากขึ้น [4]

เซนเซอร์วัดความชื้น และอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสภาพอากาศ จึงมีการพัฒนาเซนเซอร์ความชื้นโดยอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในบรรยากาศไม่ว่าจะเป็นปริมาณสัมบูรณ์หรือปริมาณสัมพัทธ์ของจุดอัมมัตว์ที่อุณหภูมิหนึ่ง [4] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาเซนเซอร์ความชื้นแบบใช้แล้วทิ้ง ที่มีขนาดกะทัดรัด ความไวสูง และมีเสถียรภาพ โดยเคลือบด้วยหมึกกราฟีนคาร์บอน (GC) และใช้กลไกการตรวจจับความต้านทาน หลังจากเคลือบด้วยหมึกกราฟีนคาร์บอน (GC) พบว่าเซนเซอร์มีความสามารถในการนำไฟฟ้า ทำให้เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับเซนเซอร์แบบใช้แล้วทิ้ง อีกทั้งยังมีการนำกระดาษเหลือใช้มาเป็นวัสดุในการเคลือบ เนื่องจากมีความสามารถในการรีไซเคิล ราคาถูก และน้ำหนักเบา [5]

กระบวนการผลิตเซนเซอร์วัดความชื้นโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากแผ่นพลาสติกนั้นมีความน่าสนใจเนื่องจากพลาสติกมีความเหนียว แม้จะทนความร้อนได้ไม่มากนักแต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้เป็นอย่างดี และเป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้พลาสติกมีความแข็ง และความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พลาสติกยังมีพื้นที่ผิวสูงทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของไอน้ำบนตัวเซนเซอร์ [6]

และคาร์บอนยังถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเนื่องจากโครงสร้างที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง [7]

สำหรับงานวิจัยนี้สนใจที่จะใช้วัสดุหลักตั้งต้นเป็นแผ่นฟิล์มพลาสติก เริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้น และนำไปประยุกต์เป็นกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม จากนั้นศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และประยุกต์ไปใช้เพื่อตรวจจับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ โดยฟิล์มพลาสติกนี้เป็นของเสีย หรือขยะของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ยังมีสภาพที่สามารถนำไปใช้งานต่อ กล่าวคือมีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้ดี เหนียวมากที่อุณหภูมิต่ำ มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีมาก อากาศสามารถซึมผ่านได้ดี ผลการวิจัยที่ได้จำสามารถลดของเสียที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรม และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งอีกทางหนึ่ง

1.3 คำถามการวิจัยและวัตถุประสงค์

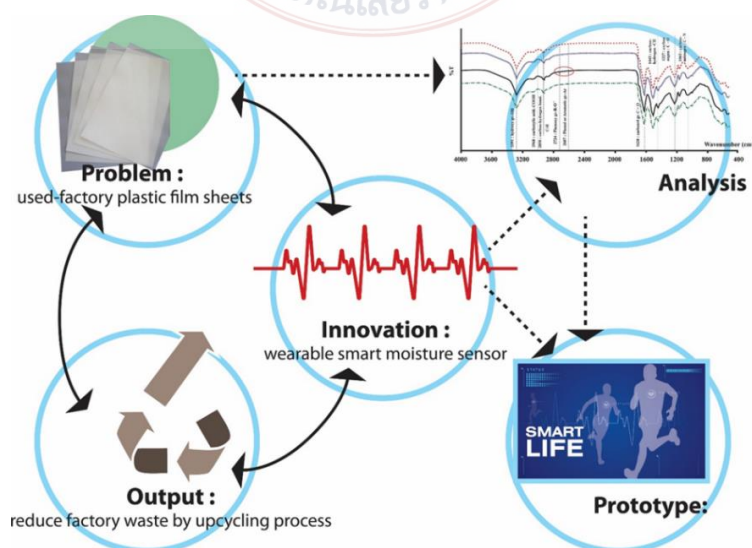
คำถามการวิจัย

1. การลดปัญหาขยะอุตสาหกรรมทำได้อย่างไร
2. การเพิ่มมูลค่าให้แก่ขยะอุตสาหกรรมทำได้อย่างไร

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบเซนเซอร์วัดความชื้นจากแผ่นฟิล์มพลาสติกเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
2. เพื่อวิเคราะห์และทดสอบลักษณะผลิตภัณฑ์ต้นแบบ
3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

1.4 กรอบการวิจัย



รูปที่ 1.1 กรอบการวิจัย

1.5 เป้าหมาย หรือผลผลิตหรือสำเร็จของโครงการวิจัย

ผลผลิตของโครงการวิจัย: ผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ตรวจจับความชื้นแบบสวมใส่ได้

ผลสำเร็จของโครงการวิจัย: ลดปริมาณขยะพลาสติก และเพิ่มอัตราการนำขยะกลับมาใช้

1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ด.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. การเตรียมตัวอย่างแผ่นฟิล์มพลาสติกจากโรงงานอุตสาหกรรม												
2. การผลิตอิเล็กทรอนิกส์แบบเหนียวนำด้วยเลเซอร์												
3. การวิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ												
4. การทดสอบประสิทธิภาพเซนเซอร์ (การตรวจจับความชื้น)												
5. สรุปและอภิปรายผล												

1.7 ผลผลิต ผลลัพธ์ และผลกระทบจากงานวิจัยที่สอดคล้องกับ OKR

ระยะเวลา	กิจกรรม	Output	Outcome	Impact
เดือนที่ 1-6 (6เดือน)	1. เตรียมตัวอย่างแผ่นฟิล์มพลาสติกจากโรงงานอุตสาหกรรม 2. การผลิตอิเล็กทรอนิกส์แบบเหนียวนำด้วยเลเซอร์	1. ผลิตภัณฑ์จากขยะพลาสติกประเภทเซนเซอร์แบบสวมใส่ได้ ที่ผ่านการพัฒนาจากกระบวนการด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม	ลดปริมาณขยะพลาสติก	ลดค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะพลาสติก
เดือนที่ 7-12 (6เดือน)	3. การวิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ 4. การทดสอบประสิทธิภาพเซนเซอร์ (การตรวจจับความชื้น)	1. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ตรวจจับความชื้นแบบสวมใส่ได้	เพิ่มอัตราการนำขยะกลับมาใช้	ลดค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะพลาสติก

1.8 แนวทางการขับเคลื่อนผลงานวิจัยและนวัตกรรม

การดำเนินโครงการวิจัยเป็นการสร้างทีมจากกลุ่มนักวิจัยที่มีองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ รวมกันศึกษาลักษณะองค์ประกอบทางกายภาพ และเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ได้จากขยะแผ่นฟิล์มพลาสติกของบริษัท ไฮ-เทค แอพพารেল จำกัด และนำองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ รวมถึงนวัตกรรมมาเป็นเครื่องมือหลักในการเพิ่มมูลค่าให้แกขยะพลาสติกที่มีคุณลักษณะเฉพาะตัว เพื่อนำวัสดุตั้งต้นเหล่านั้นไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริง จากความสำเร็จที่เกิดขึ้น จะเป็นแนวทางการต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้จริงโดยการสร้างทีมวิจัยร่วมกับนักวิจัยทางสถาปัตยกรรมและการออกแบบในการจัดทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน เพื่อส่งเสริมการใช้ชีวิตแบบอัจฉริยะตามแนววิถีใหม่ที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

โครงการวิจัยนี้มีความร่วมมือกับบริษัทไฮ-เทค แอพพารেল จำกัด โดยได้รับการสนับสนุนวัตถุดิบประเภทขยะแผ่นพลาสติกจากกระบวนการพิมพ์แบบถ่ายโอนความร้อน (Transfer printing) โดยบริษัทจะมีการคัดแยกขนาด และทำความสะอาดเบื้องต้นก่อนนำไปใช้งานและมีการวิเคราะห์ปัญหาด้านขยะพลาสติกร่วมกับสถานประกอบการ และกำหนดเทคโนโลยีและนวัตกรรมในการแก้ไขปัญหารวมกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการพัฒนาร่วมกันของทีมวิจัยจะได้เป็นเซนเซอร์ที่มีความสามารถในการตรวจสอบความชื้นที่สัมพันธ์กับอัตราการ เต้นของคลื่นหัวใจ ในอนาคตจะได้มีการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปขยายผลการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงกับพนักงานและบุคลากรในองค์กร และนำไปขยายผลยังกลุ่มเป้าหมายอื่นในอนาคต ผลการดำเนินงานนอกจากจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะพลาสติก และมีผลิตภัณฑ์ได้จากเศษขยะพลาสติกของกระบวนการในการผลิต เป็นการสร้างภาพลักษณ์ให้แกองค์กรในการจัดการขยะแบบเป็นรูปธรรม

1.9 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นแบบสวมใส่ได้ในอนาคต
2. ได้เซนเซอร์วัดความชื้นที่มีประสิทธิภาพในการวัดความชื้นแบบสวมใส่

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการอัพไซเคิล

การอัพไซเคิล (Upcycle) เป็นคำประสมที่เกิดจากคำว่า อัปเกรด (Upgrade) รวมกับคำว่า รีไซเคิล (Recycling) ที่มีความหมายถึงการนำเอาเศษวัสดุต่าง ๆ ที่จะกลายเป็นขยะแล้วกลับมาทำเป็นของใช้ใหม่ โดยใส่ไอเดียใหม่ ๆ ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มความสวยงาม ทำได้โดยการตัดแต่ง แล้วนำมาประกอบ หรือประดิษฐ์เป็นของใช้หรือของ ตกแต่งบ้าน เป็นต้น ดังนั้นการอัพไซเคิลจึงหมายถึงการนำวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้แล้ว หรือไม่สามารถใช้ประโยชน์ตามหน้าที่ดั้งเดิมมาทำให้มีมูลค่าหรือใช้ได้ดีกว่าเดิม ด้วยการชุบชีวิต หรือยืดอายุของสิ่งของเหลือใช้ไม่ให้กลายเป็นขยะเร็วเกินไป ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัพไซเคิลใหม่นี้จะมีคุณภาพ และมีมูลค่าที่เพิ่มขึ้น จึงถือได้ว่าการนี้เป็นกระบวนการที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [8-9] และช่วยลดการใช้ทรัพยากรสิ่งแวดล้อมใหม่ที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิต

ความสำคัญของการยกระดับของผลิตภัณฑ์จากการอัพไซเคิลแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ

1) การยกระดับด้วยการดีไซน์ เช่น ฟรีทีก (Freitag) จากประเทศสวิตเซอร์แลนด์ นำผ้าใบคลุมรถบรรทุกมาดัดแปลงทำเป็นกระเป๋าแอสเชเจอร์สำหรับสะพายข้าง (Rassager bag) หรือการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์รีบริส (Rebris) ของประเทศเกาหลีใต้ โดยนำอะไหล่จักรยานมาทำเป็นนาฬิกา หรือโคมไฟ และ

2) การยกระดับโดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ หรือเทคนิคใหม่ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้กระดาษทั้ง 2 หน้าในสำนักงาน และการคิดค้นโพสอิท Paper's back ที่สามารถเขียนได้ทั้ง 2 หน้า

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าการอัพไซเคิลต้องใช้การออกแบบเข้ามาช่วยเพิ่มมูลค่าให้ผลิตภัณฑ์ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการยืดอายุวัสดุให้เป็นขยะช้าลง ชะลอการเกิดขยะโดยเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้ ให้สามารถใช้ต่อไปได้และเป็นได้มากกว่าขยะเหลือทิ้ง รวมถึงช่วยลดการใช้ผลิตภัณฑ์ใหม่ ที่ผ่านมาก็จะมีแบรนด์สินค้าต่าง ๆ นำกระบวนการอัพไซเคิลมาพัฒนาสินค้า หรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยคำนึงถึงความรับผิดชอบต่อสังคม เช่น บริษัทอาดิดาส ร่วมมือกับ Parley for the oceans ผลิตรองเท้าวิ่งตามโครงการ "LOOP CREATION PROCESS" [10] รองเท้าที่ผลิตขึ้นนี้สามารถนำมารีไซเคิลได้ 100% เมื่อหมดอายุการใช้งาน โดยแนวคิดในการผลิต

รองเท้านี้ออกแบบให้ชิ้นส่วนด้านบนทำจากเส้นด้ายและเส้นใยซึ่งรีไซเคิลมาจากขยะพลาสติกในแหล่งน้ำ และอวนประมงผิดกฎหมายในทะเลลึก มาพัฒนาผ่านกระบวนการอัดรีดให้มีความแข็งแรงและการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่เสริมศักยภาพทางการตลาดได้อย่างก้าวกระโดดเป็นต้น

แนวคิดการอัดรีดเป็นแนวคิดที่มีการพัฒนา และมีความชัดเจนมากขึ้นในปัจจุบัน สามารถนำมาสร้างเป็นจุดขายเพื่อการแข่งขันด้านพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างกว้างขวาง ประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการพัฒนานี้ไม่เพียงแต่ทำให้เกิดข้อดีในด้านการลดปัญหาด้านขยะ ของเสีย หรือสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่ยังเป็นการช่วยยืดอายุการใช้ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ก่อนที่จะนำที่ที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิต อีกทั้งยังสามารถเสริมภาพลักษณ์ให้กับองค์กรได้อีกทางหนึ่ง [11]

2.2 เซนเซอร์

เซนเซอร์ หมายถึงชุดอุปกรณ์ ระบบ หรือวงจร ที่ทำหน้าที่ตรวจวัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับรู้ของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นรูป รส กลิ่น เสียง หรือการสัมผัส โดยเซนเซอร์จะทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ หรือลักษณะของสารที่เป็นเป้าหมายในการวิเคราะห์ (Analytical target) และแสดงผลในลักษณะของสัญญาณที่สามารถตรวจวัดในเชิงปริมาณเช่น สัญญาณไฟฟ้า (Electricity) สัญญาณกลศาสตร์ (Mechanic) หรือสัญญาณเชิงแสง (Optic) หลักการทำงานของเซนเซอร์ คือการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ (Detective) แต่ละชนิด เช่น แสง สี น้ำหนัก หรืออุณหภูมิ ที่เกิดขึ้นระหว่างเป้าหมายที่ต้องการวัดกับตัวทำปฏิกิริยาที่จำเพาะ จากนั้นส่งผ่านความแตกต่างนี้ไปยังทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หรือเครื่องแปลงสัญญาณเพื่อเปลี่ยนสัญญาณที่เกิดขึ้นไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถตรวจสอบได้ และวิเคราะห์ผลผ่านระบบประมวล และแสดงผลเป็นผลลัพธ์ (Display system) [12]

2.2.1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์ ประกอบด้วยส่วน ส่วนหลัก 3 ได้แก่

1) ส่วนของเซนเซอร์ ทำหน้าที่รับรู้ปริมาณตัวแปรที่ต้องการทราบค่า เช่น แสงสว่าง อุณหภูมิ การกระจัด ความชื้น ความดัน แล้วแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าส่งไปยังภาควงจรปรับแต่งสัญญาณ ที่สามารถเลือกใช้ตามความต้องการ เช่น เซนเซอร์พารอกซิมีต ทำหน้าที่ตรวจจับวัตถุ เช่นการใช้งานในโทรศัพท์มือถือเมื่อมีการทาบทโทรศัพท์กับหูจอก เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ และจะปิดการทำงานของหน้าจอทันทีเป็นต้น

2) วงจรปรับแต่งสัญญาณ คือการปรับแต่งสัญญาณจากส่วนเซนเซอร์ที่ไม่เหมาะสม เช่นกำลังของสัญญาณมีความอ่อน หรือหนักเกินกว่าจะส่งไปยังส่วนแสดงผล หรือมีการรบกวนสัญญาณจนทำให้ข้อมูลไม่ละเอียดพอที่จะทำการแปลงผล ดังนั้นในวงจรจะต้องมีส่วนที่จะทำหน้าที่ในการปรับการจ่ายไฟให้แรงขึ้น หรือลดการจ่ายไฟลง รวมถึงระดับความแรงในการส่งสัญญาณต่าง ๆ ก่อนส่งต่อไปยังเซนเซอร์

3) อุปกรณ์แสดงผล ทำหน้าที่แสดงค่าที่ได้จากการวัดว่าตัวแปรที่ต้องการทราบค่าผ่านตัวแสดงผลในลักษณะต่าง ๆ เช่นรูปแบบจอสัญญาณแอลอีดี สัญญาณเสียงเตือน หน้าปัดเข็มมิเตอร์ หรือหน้าจอแสดงผลที่ผ่านการแปลงเป็นค่าตัวเลขแล้ว [13]

2.2.2 การใช้งานเซนเซอร์ ในหลายอุตสาหกรรมนิยมนำเซนเซอร์มาช่วยอำนวยความสะดวกอย่างแพร่หลาย เช่นในด้านอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร และการตรวจสอบสภาพแวดล้อม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เซนเซอร์ด้านการเกษตร และอาหาร ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาส่งเสริมการทำการเกษตร เพื่อลดภาระค่าใช้จ่าย และเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น และเทคโนโลยีเซนเซอร์ก็เป็นหนึ่งเทคโนโลยีหลักที่นำมาใช้ในการพัฒนาระบบเกษตรกรรม เนื่องจากมีความแม่นยำสูงสามารถนำมาใช้ในการควบคุมการเพาะปลูก สามารถตรวจสอบสภาพคุณภาพของผลผลิตและใช้ในการคิด วิเคราะห์ต้นทุน และกำไรได้อย่างทันที่

โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการกำกับดูแล อย่างใกล้ชิด หรือใช้ความรู้เชิงลึก ทำให้การเรียนรู้ของเกษตรกรรุ่นใหม่ไม่ยุ่งยาก อีกทั้งยังช่วยอำนวยความสะดวกให้เกษตรกรที่มีประสบการณ์อยู่แล้ว สามารถบริหารจัดการการทำการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เกษตรกรสามารถเข้าถึงการใช้เทคโนโลยีได้ง่ายมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่แนวทางในการพัฒนาระบบเกษตรกรรมอัจฉริยะ (Smart farmer)

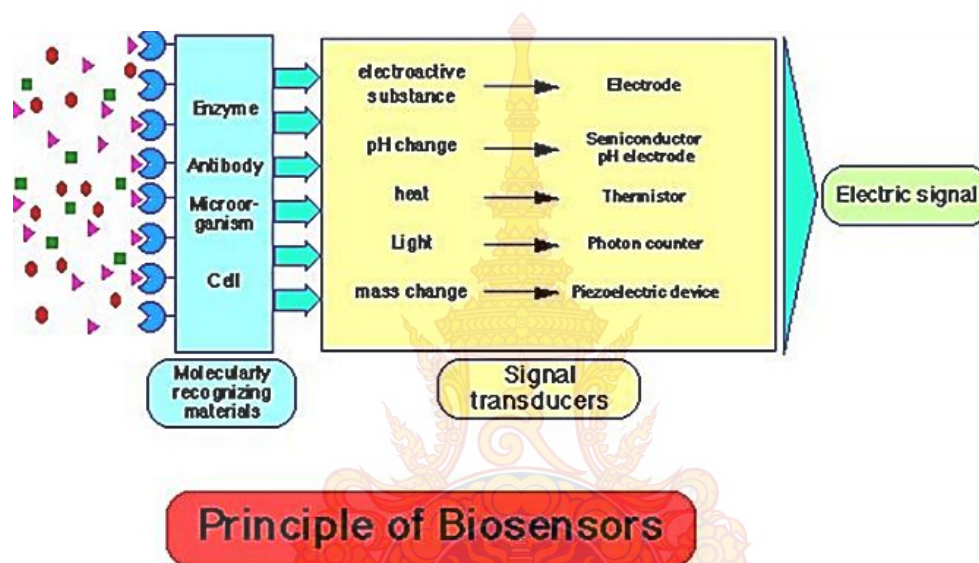
2) เซนเซอร์ตรวจวัดสภาวะแวดล้อม และสภาพอากาศ เซนเซอร์ตรวจวัดสภาวะแวดล้อมทำหน้าที่ตรวจวัดสภาพอากาศทั้งในรูปแบบที่เป็นวงกว้าง และในรูปแบบที่เป็นพื้นที่จำเพาะ ซึ่งอาจทำการวัดอุณหภูมิ วัดความชื้นในอากาศวัดปริมาณแสงแดด วัดปริมาณน้ำฝน วัดความเร็วของลม และทิศทางลมได้ [14]

3) เซนเซอร์ตรวจวัดคุณสมบัติสภาพดินที่ใช้สำหรับการเพาะปลูก เซนเซอร์นี้เป็นเซนเซอร์ที่สำคัญเนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยตรงซึ่งอาจมีการวัดค่าต่าง ๆ เช่น วัดปริมาณแสงแดด อุณหภูมิ ค่าความชื้น ตรวจวัดปริมาณแร่ธาตุต่าง ๆ รวมไปถึงวัดค่าความโปร่งความร่วนซุยของดินส่งผลต่อการยึดตัวของรากในดิน [15]

4) เซนเซอร์ตรวจสอบคุณภาพของผลผลิต เช่นคุณภาพของผลผลิตในทางการเกษตร เช่น ช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยว และปริมาณของผลผลิต เซนเซอร์ประเภทนี้จะมีการออกแบบจำเพาะตามชนิดของพืช หรือผลผลิตที่ต้องการตรวจวัด เช่น ตรวจวัดค่าความสุกของพืชผล หรือปริมาณน้ำตาล เป็นต้น [16]

2.2.3 ไบโอสเซนเซอร์ (Biosensor) ไบโอสเซนเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นตัวตรวจวัดทางชีวภาพที่นักวิทยาศาสตร์พัฒนาขึ้นเพื่อให้ติดตามสารที่ต้องการตรวจวัด โดยใช้สารชีวภาพอาทิ เอนไซม์ แอนติบอดี กรดนิวคลีอิก หรือดีเอ็นเอ ซึ่งมีความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ต้องการวิเคราะห์

เพราะมีลักษณะกลไกแบบแม่กุญแจ และลูกกุญแจ เมื่อสารชีวภาพจับกับสารที่ต้องการวิเคราะห์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมี ซึ่งมีลักษณะเฉพาะเช่น การผลิตสารที่เป็นตัวกลางทางไฟฟ้า ไอออน อิเล็กตรอน ความชื้น ออกซิเจน ความร้อน และสี ซึ่งจะมีทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเหล่านี้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าสัญญาณที่ได้แปรตามปริมาณสิ่งที่กำลังติดตาม [17] ดังรูปที่ 2.1



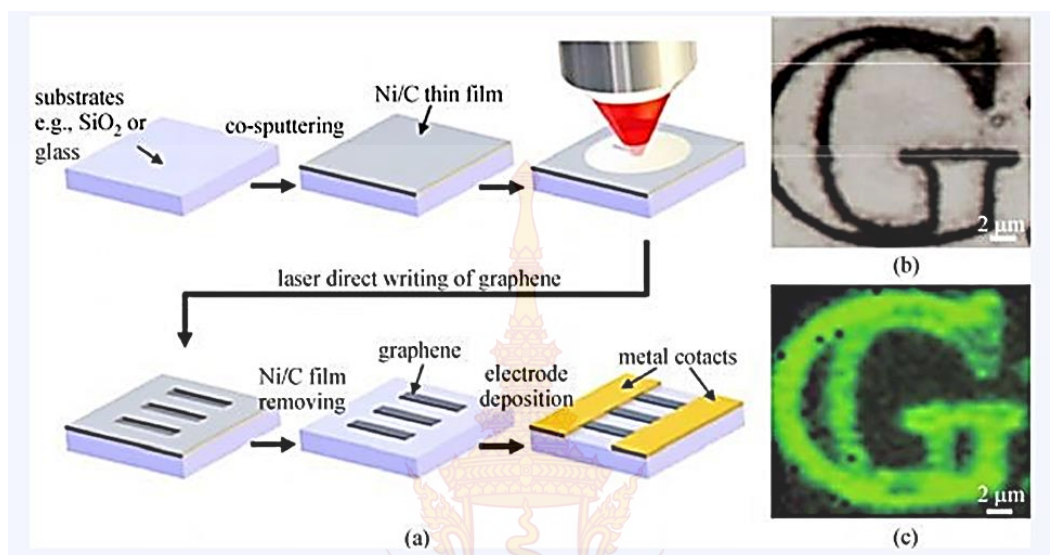
รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของไบโอเซนเซอร์ [18]

2.3 การสร้างเซนเซอร์ด้วยเลเซอร์โดยตรง

ปัจจุบันมีงานวิจัยของกลุ่มวิจัยสาริตใหม่ได้นำเสนอแนวทางการเติมกราฟีนในอากาศโดยใช้เทคโนโลยีการเขียนด้วยเลเซอร์อย่างง่าย เทคโนโลยีนี้ไม่เพียงแต่ทำงานด้วยการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ แต่ยังสามารถใช้การเติมกราฟีนในร่องของแบบที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเกิดออกซิเดชันที่เกิดจากเลเซอร์ของ 6,13-บิส(ไตรไอโซโพรพิลไซลิไธน)เพนเทน (6,13-bis Triisopropylsilyl ethynyl) pentacene; TIPS-pentacene) ที่เป็นโพลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สามารถสร้างฟิล์มบางอินทรีย์สำหรับสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ โดยกระบวนการปั่นหล่อ (Spin casting) บนกราฟีนที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุ ของสนามกราฟีนส่งผลต่อทรานซิสเตอร์ซึ่งจะค่อยๆ เปลี่ยนจากค่าบวก (Positive-type; p type) เป็นศูนย์ (Intrinsic) จากนั้นเป็นลบ (Negative-type ; p-type) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้บ่งชี้ว่าระดับการเคลือบของสารสามารถควบคุมได้โดยระยะเวลาในการเปิดรับแสงเลเซอร์และหรือความเข้มของเลเซอร์

การเพิ่มคุณสมบัติที่น่าสนใจนี้เพียงแค่อุปกรณ์ใช้การเคลือบด้วยสาร TIPS-pentacene และระบบเลเซอร์ที่มองเห็นได้พลังงานต่ำ จึงเป็นวิธีที่สะดวก และราคาไม่แพง อีกทั้งเป็นการเปิด

เทคโนโลยีสู่การผลิตที่คุ้มค่าด้วยการสร้างกราฟีนอิเล็กทรอนิกส์ ในระดับอุตสาหกรรม [19] ตัวอย่างการเขียนเลเซอร์โดยตรงดังรูปที่ 2.2



a) การเขียนกราฟีนโดยตรงด้วยเลเซอร์ b) การเขียนกราฟีนด้วยเทคนิคการนำแสง (Optical)

c) การเขียนกราฟีนบนแก้วด้วยเทคนิครามาน

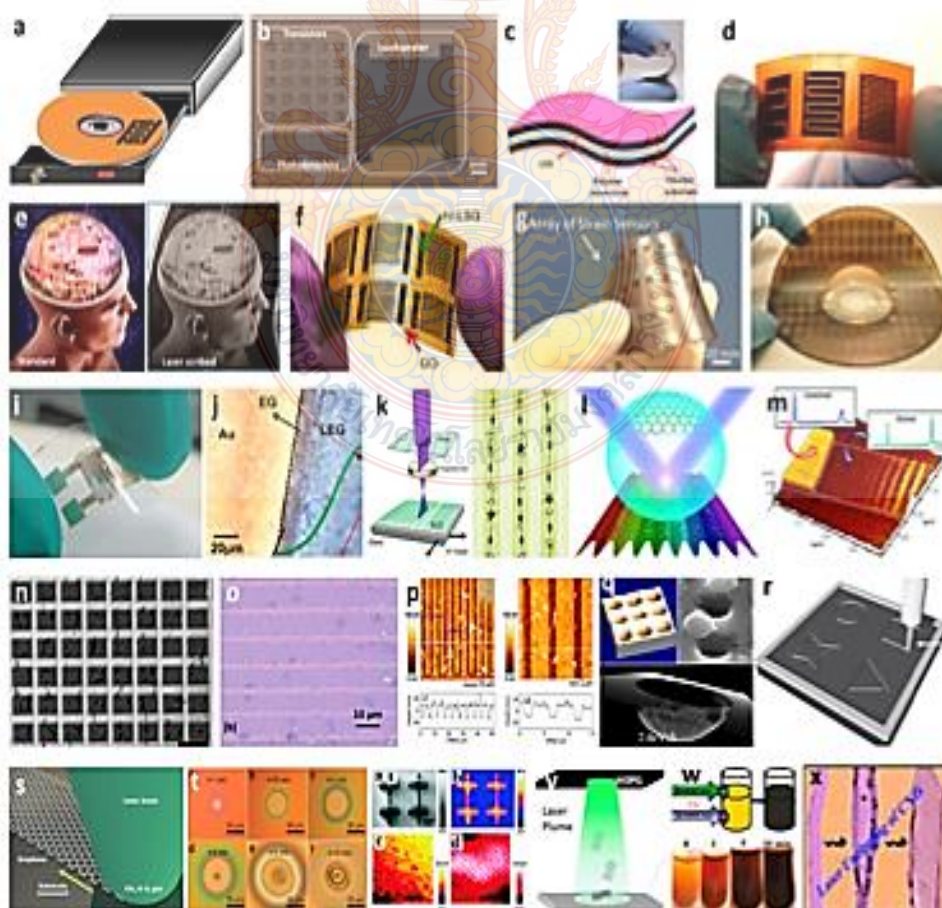
รูปที่ 2.2 การเขียนกราฟีนโดยตรง [19]

จากความท้าทายในอนาคตของเทคโนโลยีการรวมกราฟีนเข้ากับวงจรปฏิบัติการยังคงเป็นเรื่องท้าทาย แต่นักวิจัยจำเป็นต้องระบุปัญหาเกี่ยวกับการวัดที่เกี่ยวข้องกับการใช้กราฟีนเพื่อยกระดับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จากห้องปฏิบัติการสู่ระดับการค้า อีกความท้าทายคือการผลิตกราฟีนคุณภาพสูงที่มีค่าใช้จ่ายที่สามารถยอมรับได้

2.3.1 การเขียนเลเซอร์โดยตรงของกราฟีนอิเล็กทรอนิกส์ ได้กลายเป็นเทคโนโลยีที่มีแนวโน้มที่น่าสนใจอย่างรวดเร็ว ราคาไม่แพง และการผลิตกราฟีนที่มีความยืดหยุ่นสำหรับการใช้งานต่าง ๆ อีกทั้งเทคนิคนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่ม หรือลด และแก้ไขกราฟีนโดยไม่ต้องมีการสัมผัสกับเครื่องมือโดยตรง ด้วยเทคนิคในการผลิตเพียงขั้นตอนเดียวนี้จึงสามารถป้องกันปัญหาที่เกิดกับการใช้เทคนิควิธีการลิโทกราฟีแบบใช้แสง (Photolithography) ที่เป็นวิธีการในการผลิตแบบจากใหญ่ไปเล็กนี้ ปัจจุบันเทคนิคนี้เป็นเทคโนโลยีหลักในการสร้างวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะการผลิตชิปคอมพิวเตอร์ โดยมีการถ่ายแบบย่อส่วนจากแม่พิมพ์ หรือที่เรียกว่าหน้ากาก ด้วยแสงลงบนพื้นผิวที่ต้องการจะสร้างวงจร และนำไปผ่านขั้นตอนทางเคมีต่าง ๆ ที่ไปกัดก่อนพื้นผิวให้เป็นลวดลายเหมือนแบบที่ถ่ายไว้แล้ว คล้ายกับการถ่ายภาพแล้วไปอัดรูปลงบนกระดาษ แต่การสร้างในลักษณะนี้มี

ข้อจำกัดทางเทคโนโลยี คือ การใช้แสงธรรมดาไม่สามารถให้รายละเอียดคมชัดได้ในระดับนาโน จึงมีการพัฒนาวิธีอื่น ๆ ขึ้นมา เช่น การใช้แสงอัลตราไวโอเลต (UV) หรือใช้รังสีเอ็กซ์ (X-ray) นอกจากนั้นยังมีการประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ลำแสงอนุภาคโลหะ มาเป็นเสมือนใบมีดที่ไปสลักสิ่งของให้เป็นรูปร่างระดับนาโนตามต้องการได้

ตัวอย่างการใช้เทคนิคนี้ในชีวิตประจำวัน เช่นการแกะสลัก หรือการบดย่อยวัตถุต่าง ๆ จากที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง รวมถึงการเขียนโดยตรงอุปกรณ์ของ กราฟิโนอิเล็กทรอนิกส์จำนวน เช่น การเขียนทรานซิสเตอร์โดยตรงสำหรับการใช้เป็นเครื่องตรวจจับแสง (Photodetectors) สร้างตัวเก็บประจุด้วยไฟฟ้าสองชั้นที่สามารถกักเก็บพลังงานจำนวนมากทั้งแบบการใช้งานเชิงลึก (Advanced supercapacitors) และตัวเก็บประจุด้วยไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro-supercapacitors) เซนเซอร์ (Sensors) วงจรยืดหยุ่น แผงระบายความร้อน เครือข่ายการสร้างระบบประสาท และแอปพลิเคชันอื่น ๆ อีกมากมาย [20] ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเขียนเลเซอร์โดยตรงบนกราฟิโนอิเล็กทรอนิกส์ [20]

นอกจากนี้ระบบเลเซอร์แบบธรรมดาสามารถใช้กับการเขียนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยตรง ตัวอย่างเช่น เครื่องเขียนดีวีดี และการทำป้ายเป็นลวดลายโดยตรงบนฟิล์มกราฟิ์ท้อกไซด์ เคลือบบนพื้นผิวที่เลือก เทคนิคนี้แสดงให้เห็นสัญญาสำหรับการผลิตจำนวนมากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กราฟิ์น ตัวอย่างเช่นสามารถผลิตไมโครซูเปอร์คาปาซิเตอร์มากกว่า 100 ตัวบน ดิสก์แผ่นเดียวในเวลาน้อยกว่า 30 นาที

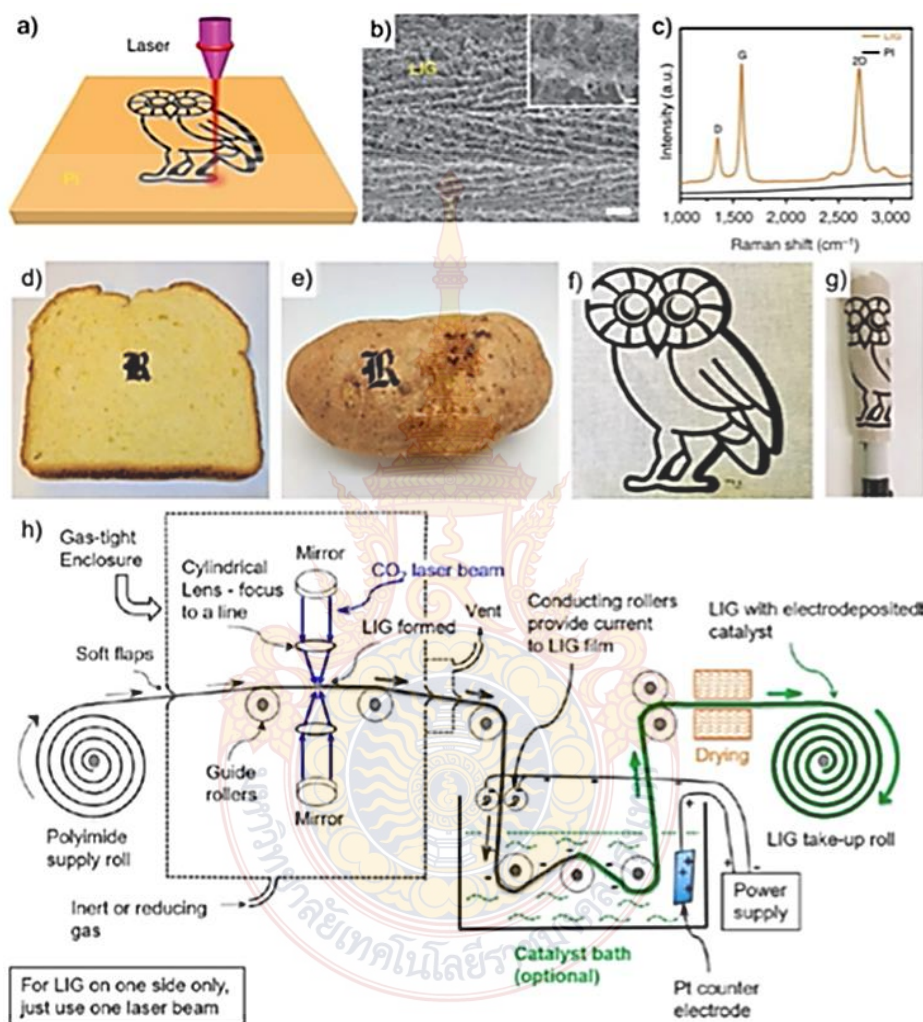
2.2.2 กระบวนการพิมพ์วัสดุชนิดม้วนโดยตรง พิมพ์วัสดุชนิดม้วนแบบต่อเนื่อง (Roll-to-Roll) สำหรับกราฟิ์อิเล็กทรอนิกส์ กราฟิ์นมีข้อดีเหนือสารพวกซิลิกอนทั่ว ๆ ไปคือสามารถ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยืดหยุ่นได้ ในขณะที่ถ้าทำการตัดซิลิกอนเวเฟอร์จะแตกเป็นชิ้น ๆ ดังนั้นกราฟิ์นจึงเป็นการเปิดตลาดเทคโนโลยีใหม่ที่ไม่สามารถเข้าหาได้จากซิลิกอนอิเล็กทรอนิกส์ การ ยืดหยุ่นได้ของกราฟิ์นอิเล็กทรอนิกส์ สามารถนำมาใช้กับอุปกรณ์ เครื่องมือ, สิ่งประดิษฐ์, หรือ อุปกรณ์ ที่เพิ่มความสะดวก และความเพลิดเพลิน หรือเรียกอีกอย่างว่าแกดเจ็ตอัจฉริยะ (Smart gadget) เทคนิคนี้สามารถนำระบบประมวลผลใส่ลงในผ้าพันแผลอัจฉริยะเพื่อตรวจสอบ และช่วยในการรักษา บาดแผล หรือใส่เข้าไปในแท็กอาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification; RFID) หมายถึงระบบ เก็บข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มความสามารถในการคำนวณและการรักษาความปลอดภัยของ ข้อมูล และส่งกำลังโดยคลื่นแม่เหล็ก หรือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแทนการสัมผัสทางกายภาพ เป็นการ เอาคลื่นวิทยุมาเป็นคลื่นพาหะ เพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลที่สามารถใช้สำหรับติดตามสินค้า

จากเทคนิคทั้ง 2 รูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่าการสร้าง และใช้กราฟิ์นเป็นอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วิธีที่ปรับขนาดได้ และกระบวนการพิมพ์วัสดุชนิดม้วน เข้ามาใช้ในการ ประมวลผลแบบมีความก้าวหน้าอย่างเห็นได้ชัด และหากประสบความสำเร็จในการผลิตกราฟิ์น อิเล็กทรอนิกส์เชิงการทดลองอย่างแท้จริง จะทำให้การผลิตแบบการค้าเป็นไปได้ง่ายเนื่องจากมี ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าค่าใช้จ่ายของเซมิคอนดักเตอร์แบบดั้งเดิม [20-21]

2.4 กราฟิ์นที่เหนี่ยวนำด้วยเลเซอร์

ในปี 2014 มีรายงานการผลิตฟิล์มกราฟิ์นที่มีรูพรุนจากฟิล์มโพลีเมอร์เชิงพาณิชย์ โดยใช้ เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นที่หลากหลาย เช่นเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ laser) เรียกว่าเทคนิค กราฟิ์นที่เหนี่ยวนำด้วยเลเซอร์ (Laser induced graphene, LIG) เลเซอร์เซมิคอนดักเตอร์ และ เลเซอร์ใกล้อินฟราเรด (NIR) เป็นต้น สำหรับเทคนิคในการใช้เลเซอร์นั้นมิกลไกที่สำคัญขึ้นอยู่กับความ ยาวคลื่นของเลเซอร์ซึ่งเป็นตัวกำหนดผลกระทบทางเคมี และแสง ที่เกี่ยวข้อง ในกระบวนการลด ขนาดที่เกิดจากเลเซอร์ สองกระบวนการย่อยที่เกิดขึ้นคือ การแปลงโดยตรงจากคาร์บอน sp³ เป็น sp² และการกำจัดหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน ซึ่งเกิดร่วมกับกระบวนการเลเซอร์ จะทำให้วัสดุที่ได้มี พื้นผิวสูงประมาณ 340 ตารางเมตรต่อกรัม มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงที่อุณหภูมิสูงกว่า 900

องศาเซลเซียส และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าดีเยี่ยมอยู่ที่ค่า 5–25 วินาทีต่อเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การใช้กราฟีนเหนียวนำด้วยเลเซอร์ [21]

รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการใช้กราฟีนเหนียวนำด้วยเลเซอร์โดยกระบวนการจัดรูปเลเซอร์แบบบนพื้นผิวโดยตรงตามรูป a) สันฐานวิทยาจากการส่องกราดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) ตามรูป b) สเปกตรัมแบบสามมิติของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (3D Raman spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูงยิงผ่านเข้าไปยังสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการกระเจิงแสง ทำให้เห็นโครงสร้างรูพรุนบน พื้นผิวที่แสดงถึงความสามารถในการเข้าถึงได้เพิ่มขึ้น และอิเล็กโทรไลต์สามารถแทรกซึมเข้าไปในวัสดุที่ใช้งาน ตามรูป c) นอกจากนี้เลเซอร์ยังใช้มีความสามารถในการเปลี่ยนพื้นผิวหลากหลายเป็นกราฟีน เช่น ผ้า กระดาษ หนัง มันฝรั่ง กะหล่ำมะพร้าว ไม้ก๊อก ไม้ ลิกนิน และเรซินฟีนอลิกตามรูปที่ d-g) [21]

สำหรับกระบวนการผลิตฟิล์ม LIG และฟิล์มในระดับอุตสาหกรรมนั้นเป็นการดัดแปลงสารตั้งต้นของพอลิเมอร์เชิงพาณิชย์ และกระบวนการเลเซอร์ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเซ็นเซอร์กราฟีนชนิดอื่น ๆ พบว่าเซ็นเซอร์ LIG นี้แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบอย่างมากของการผลิตแบบเร่งด่วน และมีศักยภาพมหาศาลสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์ ในการปรับปรุง LIG ด้วยการเติมสารต่างชนิดกัน หรือการก่อตัวของคอมโพสิตนั้นเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการสร้างคุณสมบัติ และประสิทธิภาพที่ต้องการโดยมี 3 วิธี [21] ดังนี้

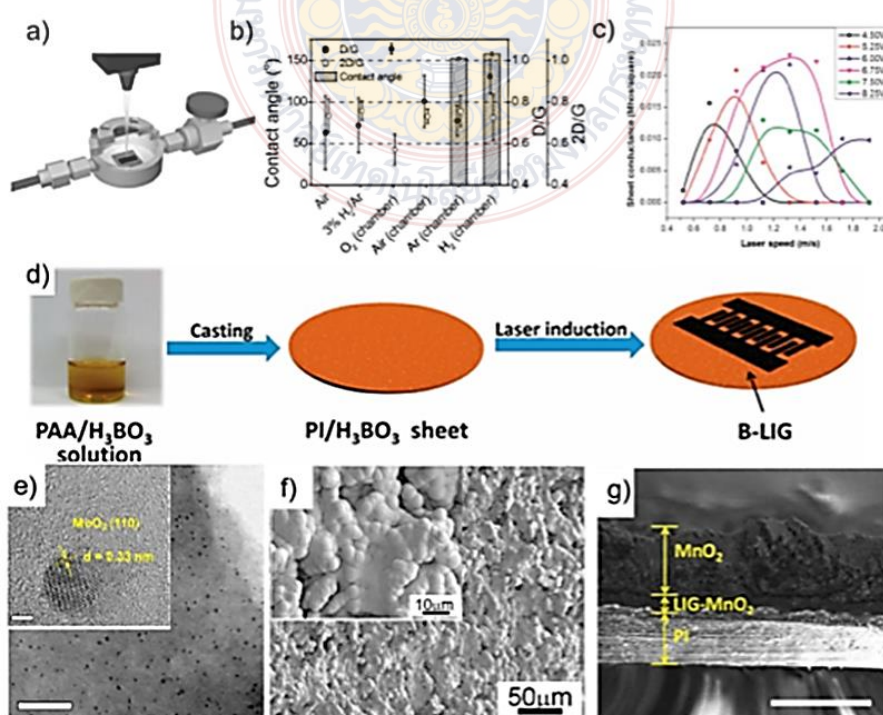
1) การปรับพารามิเตอร์เลเซอร์ สภาวะในการผลิต และกระบวนการ การพัฒนาวิธีการต่าง ๆ เพื่อปรับแต่งหรือปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของ LIG โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เลเซอร์ หรือการควบคุมการลดสภาวะที่ใช้ Yang และคณะ (2018) พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของ LIG รวมถึงสัณฐานวิทยาของพื้นผิว การคาร์บอนไนเซชัน และความสามารถในการเปียกน้ำ โดยการปรับกำลังเลเซอร์ ความเร็วของการสแกน และความถี่ การควบคุมสภาวะของเลเซอร์ประเภทต่าง ๆ ทั้งออกซิเจน (O_2) อากาศ (Air) อาร์กอน (Ar) และ ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างของ LIG ที่ได้จากการเขียนเลเซอร์โดยตรงสามารถใช้งานได้ตั้งแต่บนผิวรูพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) โฟม ท่อนาโนคาร์บอน โดยรังสีของเลเซอร์นั้นจะขึ้นกับขนาดของพื้นที่ผิวที่ขบน้ำของ LIG เช่นมุมสัมผัสของหยดน้ำหรืออากาศบน LIG ตั้งแต่ 0 องศา จนถึงมากกว่า 150 องศา สำหรับอาร์กอน และไฮโดรเจนปรับมุมสัมผัสของหยดน้ำที่มุมมากกว่า 160 องศาเป็นต้น

มุมสัมผัสของเลเซอร์บน LIG ทำให้เกิดข้อบกพร่องขนาดใหญ่ทำให้สารที่มีหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนเข้าถึงได้ สามารถให้พื้นที่ใช้งานจำนวนมาก และเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรด และสปีชีส์ในสารละลาย อีกทั้งการปรับปรุงคุณสมบัติของ LIG ทำให้ผลรวมของพื้นที่ผิวจำเพาะ พื้นที่ผิวที่ขบน้ำ ความสามารถในการนำไฟฟ้า และระนาบขบที่มีอยู่ ในการใช้งานจริงสามารถปรับพื้นที่ (Site) ของเลเซอร์บน LIG ได้เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอน และเชิงวิเคราะห์ประสิทธิภาพในไบโอเซนเซอร์ LIG

2) การเติมเติมแต่งบน LIG มีงานวิจัยที่นำเสนอการผลิต LIG ที่เจือ (Doped) โบรอนจาก กรดบอริก (H_3BO_3) ผสมด้วยกรดพอลิเอมิก (Polyamic acid หรือ PPA) ด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ และตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro supercapacitors) ซึ่งให้ LIG ที่เจือโบรอนที่มีความสูง โดยมีความสูงกว่าอุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการปรับแต่งถึง 3 เท่า และความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้น 5-10 เท่า นอกจากนี้ในกระบวนการยังสามารถเจือสารที่มีสมบัติคล้ายกัน เช่น โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_2) หรือเฟอร์ไรต์ออกไซด์ (Fe_3O_4) ลงในสารละลายกรดเปอร์อะซิติก (Peracetic acid; PAA) สำหรับการผลิตด้วยเลเซอร์ทำให้เกิดโลหะนาโนคริสตัลฝังตัวที่ LIG ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ดีเยี่ยม

นอกจากนี้ในการเตรียมไบโอเซนเซอร์ยังมีการใช้สารเฮเทอโรอะตอม (Hetero atom) เจือในวัสดุคาร์บอน เพื่อเพิ่มศักยภาพในการเพิ่มสัญญาณทางไฟฟ้าในไบโอเซนเซอร์เป็นต้น และเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบการเจือด้วยสารต่าง ๆ กับวัสดุกราฟีนธรรมดาแล้ว กราฟีนที่เจือด้วยไนโตรเจนจะให้กระแสออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสำหรับการตรวจวัดด้วยไบโอเซนเซอร์ และการใช้อนุภาคนาโนของโลหะประเภททองคำ แพลตตินัม จะส่งผลให้เกิดสัญญาณทางไฟฟ้าที่ดีเยี่ยมสำหรับการตรวจวัดทางชีวภาพและการเติมอนุภาคนาโนของโลหะใน LIG จะสามารถทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของไบโอเซนเซอร์ชนิด LIG ได้อีกด้วย

3) การปรับปรุงพื้นผิวหลังการผลิต วัสดุประเภทตัวเก็บประจุแบบประจุเทียม (Pseudo-capacitor material) เช่นแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2), เฟอร์ริก ออกซิไฮดรอกไซด์ (Ferric oxyhydroxide; $\text{FeO}(\text{OH})$) หรือ พอลิแอนิลีน (Polyaniline; PANI) สามารถตรึงลงบนผิวของ LIG ได้อย่างง่ายดายสำหรับพื้นผิวที่เป็นของแข็ง สำหรับเทคโนโลยีการเขียนด้วยเลเซอร์โดยตรงนั้นยังสามารถเตรียมจากวัสดุคอมโพสิต LIG / Ni ด้วยความต้านทานต่ำกว่า 0.1 โอห์มต่อตารางเมตร การปรับปรุงพื้นผิวหลังการผลิต เช่น การฝังประจุ (Deposition) การกระจายตัว (Dispersing) การพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) หรือ การผนึกติด (Binding) ด้วยสารชีวภาพต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ดีเอ็นเอ (DNA) อาร์เอ็นเอ (RNA) แอนติบอดี เอนไซม์ ก็สามารถตรึงไว้บนพื้นผิว LIG เพื่อรองรับการตรวจสอบทางชีวภาพโดยตรงรับการตรวจสอบ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รูปแบบการผลิต LIG และคุณลักษณะที่ได้ [21]

การใช้ LIG แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติสมดุลทางความร้อน ทางเคมี และทางกลศาสตร์อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังสามารถใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติต่าง ๆ เช่น ไม้ ฝ้าย กระดาษ และ ลิกนินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ในพืช มาผลิตเป็น LIG ซึ่งในแง่ของกระบวนการใช้เลเซอร์ในการผลิต LIG และการสร้างรูปแบบอุปกรณ์ สามารถทำร่วมกันได้ โดยไม่ต้องใช้กระบวนการกัดกร่อนวิธีการลิโทกราฟีแบบใช้แสง (Photolithography) และการสะสมตัวของตะกอน (Deposition) ซึ่งส่งผลให้ไม่ต้องใช้สารอันตรายจำพวกกรดแก่ และสารออกซิแดนท์ ซึ่งอาจทำให้เกิดมลพิษหรือแม้กระทั่งการใช้เตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งต้องใช้ความร้อนมหาศาลในการรวมของพลังงาน ความหนาของ LIG สามารถปรับได้ตั้งแต่ 20 - 38 ไมโครเมตร โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์เลเซอร์ที่แตกต่างกัน หรือการฉายเลเซอร์ซ้ำ ๆ ลงบนวัสดุสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะทางสัณฐานวิทยา และโครงสร้างของ LIG ได้

การประยุกต์ใช้ LIG ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกล ที่เป็นคุณสมบัติด้านความคงตัวที่โดดเด่นที่จะนำไปใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ และมีความยืดหยุ่น ในปัจจุบันยังมีแนวโน้มในการพัฒนาโดยใช้สารตั้งต้นตามธรรมชาติมาผลิตเช่น เซอร์ด้วยกระบวนการเลเซอร์ที่เรียบง่าย และทำซ้ำได้ เนื่องจาก LIG ให้ประสิทธิภาพสูงในการผลิตของอุปกรณ์สูง มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ เหมาะอย่างยิ่งกับการประยุกต์ใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ [21]

2.5 ความชื้น

ความชื้น (Humidity) เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณของน้ำในสถานะแก๊ส ที่ปนอยู่ในอากาศ หรือก๊าซชนิดอื่น เรียกโดยรวมว่าความชื้นในอากาศ (Air humidity) ซึ่งเป็นสิ่งที่ช่วยบอกสภาพหรืออุณหภูมิของอากาศปัจจุบัน และในอนาคตล่วงหน้าได้ ความชื้นในอากาศเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ และส่งผลต่อมนุษย์ในด้านต่าง ๆ ทั้งในภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร และยา ที่จำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณความชื้นอย่างดี เนื่องจากความชื้นมีผลโดยตรงต่อคุณภาพ และระยะเวลาในการเก็บรักษาผลผลิตเป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความสำคัญในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และในอุตสาหกรรมอุปกรณ์ทางการแพทย์ ที่ต้องอาศัยการวัดความชื้นจากลมหายใจในการวินิจฉัยโรคบางชนิด หรือการควบคุมความชื้นในเครื่องช่วยหายใจให้เหมาะสมสำหรับผู้ป่วย [22] รวมถึงในการดำรงชีวิตประจำวัน เช่น ความสบายตัวในระหว่างวัน หรือการระเหยของน้ำในการตากผ้า เป็นต้น

ค่าความชื้นในอากาศสามารถวัดและแสดงผลได้ 4 รูปแบบ ประกอบไปด้วยการวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity; RH) การวัดความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity; HA)

การวัดความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) และการวัดความชื้นอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) [23] ค่าความชื้นแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) คือการวัดอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศในช่วงเวลานั้น ๆ ต่อปริมาณไอน้ำที่อาจจะมียู่ได้ เมื่ออากาศนั้นอิ่มตัวด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน หรืออัตราส่วนของความดันไอน้ำที่มีอยู่จริงต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีหน่วยวัดเป็นร้อยละ ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.1

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์} = \left(\frac{\text{ความชื้นจริงที่มีอยู่ในอากาศ}}{\text{ความชื้นที่อากาศสามารถรับไว้ได้}} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

ความชื้นมีความสัมพันธ์ต่อการรับรู้ของมนุษย์ โดยปกติค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่มนุษย์รู้สึกสบายมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 40 ถึง 60%RH [24] ที่อุณหภูมิ 18 - 25°C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงและต่ำเกินไปจะมีความสัมพันธ์ต่อความรู้สึก และสุขอนามัยของมนุษย์ได้ โดยอากาศอึดอัดจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100%RH หมายถึงความชื้นที่มีไอน้ำอยู่เต็มอากาศ อากาศจะอึดอัด และเกิดฝนตกได้ส่งผลให้มนุษย์รู้สึกร้อน อบอ้าวเนื่องจากเหงื่อที่ผิวหนังไม่สามารถระเหยไปในอากาศ โดยปกติร่างกายมนุษย์จะมีความไวต่อความชื้น และมีกระบวนการสร้างเหงื่อเพื่อกำจัดความร้อนและรักษาสมดุลของร่างกายให้มีอุณหภูมิปกติ ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์นี้อาจเกิน 100%RH ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่าอึดอัดยิ่งยวด ซึ่งค่านี้จะพิจารณาเฉพาะไอน้ำที่มองไม่เห็นเท่านั้น ดังนั้นหมอก เมฆ หมอก และละอองน้ำที่ตามองเห็นจะไม่นับรวมในการวัดนี้

ความชื้นสัมพัทธ์จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแบบแปรผกผันตรง เมื่อปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศคงที่นั่นคือถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความชื้นสัมพัทธ์จะสูงขึ้น โดยเฉพาะในฤดูร้อนค่าความชื้นสัมพัทธ์อาจสูงถึง 90%RH ส่งผลต่อการเพิ่มการปล่อยก๊าซอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในบ้านนำไปสู่ความเสี่ยงด้านสุขภาพอื่น ๆ เช่น ระคายเคืองจมูก ตา และคอ ปัญหาระบบทางเดินหายใจ อาการหอบหืด อาการแพ้ ผดร้อนบนผิวหนังจากรูขุมขนอุดตันจนเหงื่อไม่สามารถระบายออกได้ ในทำนองเดียวกันในฤดูหนาวความชื้นสัมพัทธ์อาจลดลงเหลือ 30%RH ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ อากาศจะแห้ง ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่าย และส่งผลต่อสุขภาพได้เดียวกันกับความชื้นสัมพัทธ์สูงโดยทำให้ผิวหนังเกิดอาการคันหรือแตก ริมฝีปากและผิวแห้ง เพิ่มความไวต่อโรคหวัดและโรคทางเดินหายใจ

ค่าความชื้นสัมพัทธ์สามารถวัดโดยใช้เครื่องไฮโกรมิเตอร์ (Hygrometer) โดยการวัดปริมาณไอน้ำในอากาศ ในดิน หรือในพื้นที่จำกัด เมื่อความชื้นถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าในเซ็นเซอร์ที่ทำการการสอบเทียบไว้แล้ว และแปลงเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้ในปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความชื้นสัมพัทธ์โดยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ที่อาศัยความสัมพันธ์ของการควบแน่นของอุณหภูมิที่เรียกว่าจุดน้ำค้าง หรือ

การเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้า หรือความต้านทานเข้ามาช่วยในการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้อีกด้วย ซึ่งเครื่องมือวัดเหล่านี้สามารถทำงานในลักษณะเดียวกัน และมีความแม่นยำในการใช้งาน

2.5.2 ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) คือการวัดอัตราส่วนมวลของของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อ 1 หน่วยปริมาตรของอากาศ มีหน่วยเป็นกรัม/ลูกบาศก์เมตร (g/m^3) ความชื้นสัมบูรณ์จะเปลี่ยนไปตามความดันอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป แต่ค่าความชื้นสัมบูรณ์ไม่นิยมใช้ในทางอุตุนิยมวิทยา เนื่องจากเมื่ออากาศลอยตัวขึ้นหรือจมตัวลงจะทำให้ปริมาตรของอากาศเปลี่ยนแปลงเนื่องจากบริเวณรอบ ๆ ความกดอากาศจะเปลี่ยนแปลงแม้ว่าไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศจะคงที่ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [25]

$$\text{ความชื้นสัมบูรณ์} = \left(\frac{\text{มวลไอน้ำในอากาศ}}{\text{ปริมาตรอากาศ ณ อุณหภูมิเดียวกัน}} \right) \quad (2.2)$$

2.5.3 ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) เป็นวิธีการวัดซึ่งคล้ายกับวิธีการวัดความชื้นสัมบูรณ์ การคำนวณจะพิจารณาจากมวลอากาศทั้งหมด ความชื้นจำเพาะของอากาศจะมีค่าคงที่ เมื่ออากาศขยายหรือหดตัวโดยที่ความชื้นจะไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าปริมาตรของอากาศจะขยายหรือหดตัวก็ตาม ดังนั้นหน่วยของความชื้นจำเพาะจึงเป็นกรัมต่อกิโลกรัม (g/kg) ซึ่งหมายความว่าความชื้นดังกล่าวแสดงปริมาณไอน้ำเป็นกรัมที่มีอยู่ในอากาศแต่ละกิโลกรัม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [26]

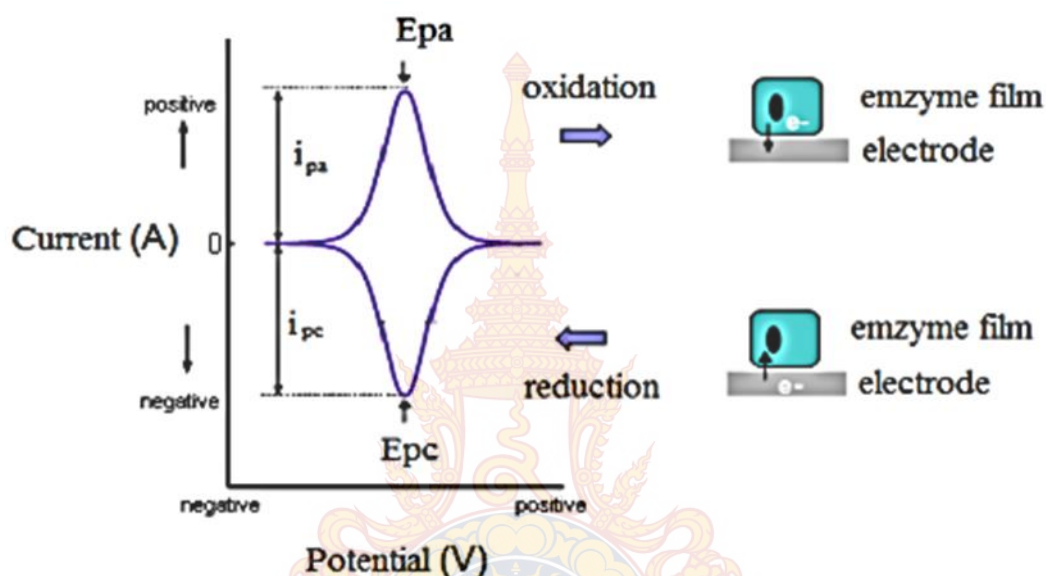
$$\text{ความชื้นจำเพาะ} = \left(\frac{\text{มวลของไอน้ำ}}{\text{มวลของอากาศชื้น}} \right) \quad (2.3)$$

2.5.4 ความชื้นอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) เป็นอุณหภูมิซึ่งทำให้ความชื้นในอากาศกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเกาะตามวัตถุ ถ้าอากาศมีไอน้ำมากอุณหภูมิของจุดน้ำค้างจะสูง แต่ถ้าไอน้ำมีน้อยอุณหภูมิของจุดน้ำค้างจะต่ำ อุณหภูมิของจุดน้ำค้างบอกถึงความไม่สะดวกสบายของมนุษย์ในช่วงที่มีอากาศอุ่น และขึ้นได้ดีกว่าความชื้นสัมพัทธ์ คนส่วนใหญ่รู้สึกว่าการอากาศชื้นไม่สะดวกสบายเมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างสูงกว่า 20°C ในขณะที่บางคนอาจรู้สึกสบายตัว เมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างสูงกว่า 17°C [27]

2.6 ไชคลิกโวลแทมเมตรี

ไชคลิกโวลแทมเมตรี เป็นการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบระหว่างค่าสองค่าแก่อิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้ขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าไปเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ทำให้สารบางชนิดที่อยู่รอบ ๆ ผิวหน้าของอิเล็กโทรดเกิดปฏิกิริยาการถ่ายเท

อิเล็กตรอน (Electron transfer reaction) บนผิวของขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรด โดยกระแสที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดได้โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอก ซึ่งรูปแบบของสัญญาณที่วัดได้จากไซคลิกโวลแทมเมตรีแสดงดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้จากวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี [28]

จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นสัญญาณในรูปของกระแสซึ่งเกิดจากการป้อนศักย์ไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทมเมตรี คือ จ่ายศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกสลับกับศักย์ไฟฟ้าลบ ซึ่งทำให้เกิดจุดยอดของกราฟซึ่งมีกระแสสูงสุด 2 จุด คือ จุดยอดของกราฟที่แสดงค่ากระแสสูงสุดที่เป็นบวก (Anodic peak current; $i_{p,a}$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation peak) เมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าค่าบวก (Anodic peak potential $E_{p,a}$) และเมื่อทำการรีเวิร์สการสแกนจากศักย์ไฟฟ้าบวกเป็นศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบ (Cathodic peak potential $E_{p,c}$) จะทำให้เกิดจุดยอดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่าเป็นลบ (Cathodic peak current; $i_{p,c}$) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction peak) สำหรับการนำวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรีมาใช้ในการงานไบโอเซนเซอร์นั้นก็เพื่อใช้วัดหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด จากการทดลองทำการสแกนศักย์ไฟฟ้าระหว่างค่าสองค่า [28]

พารามิเตอร์ที่สำคัญในไซคลิกโวลแทมโมแกรม คือค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ($E_{p,c}$, $E_{p,a}$) และค่ากระแสสูงสุด ($i_{p,c}$, $i_{p,a}$) ของสัญญาณแบบแคโทดิกและแอโนดิก หากปฏิกิริยาที่สารออกซิแดนซ์รับอิเล็กตรอนหรือเกิดปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราเร็วเท่ากับสารรีดิวซ์ให้อิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชันจะเรียกปฏิกิริยาแบบนี้ว่า ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแบบย้อนกลับได้ (Electrochemically reversible) [29]

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นการศึกษาโดยให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทางไฟฟ้าเคมี ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าช่วย ดังนี้

ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode: VE) มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเล็กเพื่อให้พื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารตัวอย่างน้อย ๆ ทำให้สามารถเกิดสถานะของโพลาริเซชันตลอดการวิเคราะห์ซึ่งมักจะใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็น โลหะเฉื่อย เช่น แพลตินัม หรือทอง โพลาริติกกราไฟท์กลาสส์ คาร์บอน และผงคาร์บอน

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode: RE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้เทียบศักย์ไฟฟ้าที่ต้องให้กับขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนี้จะมีค่าศักย์ที่แน่นอน ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจร ไม่ขึ้นกับส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ดีต้องมีส่วนประกอบคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อเก็บไว้และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ปกติแล้วค่าศักย์ของวงจรที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดสัญญาณเป็นค่าที่ได้จากผลต่างของศักย์จากขั้วไฟฟ้าทั้งสองของวงจร อาจเรียกค่าศักย์ของวงจรที่วัดได้นี้ว่า ค่าศักย์สัมพัทธ์ (Relative Potential) ถ้าขั้วไฟฟ้าตัวหนึ่งของวงจรเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่รู้ค่าศักย์แน่นอน ก็สามารถหาค่าศักย์ของอีกขั้วไฟฟ้าที่ต่อในวงจรซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานได้

ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode: CE) จะมีคุณลักษณะที่เฉพาะคือ ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าทำงาน ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่แล้วส่งต่อพลังงานที่ได้รับเข้าสู่เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าช่วยนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับหรือไม่มีเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นในขณะเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างระหว่างการวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าช่วยมักมีพื้นที่ผิวมาก ๆ เพื่อให้เป็นการนำไฟฟ้าเป็นไปได้ดี วัสดุที่ใช้ทำขั้วชนิดนี้ได้แก่ ลวดแพลตินัม หรือแผ่นแพลตินัมกลาส คาร์บอนและกราไฟท์ [29]

2.7 พลาสติก

ในปัจจุบันมีการใช้พลาสติกกันอย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวัน พลาสติกถือเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีบทบาทอย่างมาก และมีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติเบา แข็งแรง ทนทาน มีราคาถูก และสามารถผลิตให้มีรูปแบบต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้ [29] งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความสามารถในการนำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเซนเซอร์วัดความชื้นแบบสวมใส่ได้จากพลาสติกเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

2.7.1 การผลิตพลาสติก พลาสติกผลิตมาจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติใต้ผิวดิน กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกเริ่มจากการนำสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กที่ได้จากการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบมาทำปฏิกิริยากันทำให้ได้เป็นสายโซ่ยาว ที่เรียกว่าโพลิเมอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และธาตุอื่น ๆ ซึ่งโพลิเมอร์นี้จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบเริ่มต้น โพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นี้จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติก และผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต่อไป [30] พลาสติกถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติตามการใช้งานที่หลากหลาย โดยสามารถแบ่งประเภทของ พลาสติกที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) พอลิโพรไพลีน (Polypropylene; PP), พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride; PVC), พอลิไวนิลแอสเตต (Polyvinylacetate; PVA), พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS), พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate), ไนลอน (Nylon), พอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetra- fluoroethylene; PTFE) หรือ เทฟลอน, เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde) เป็นต้น [31]

2.7.2 ประโยชน์ของพลาสติก ในปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน โดยมุ่งไปที่ประโยชน์ 3 ด้าน หลักด้วยกันคือนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ ทางด้านการเกษตร และทางด้านบรรจุภัณฑ์

1) ประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น นำมาใช้ในการผลิตรากฟันเทียม ผลิตวัสดุทางการแพทย์ ที่นำมาใช้กับดวงตา ผลิตไหมเทียมเพื่อนำมาใช้ในการผ่าตัด ผลิตแคปซูลยาที่ควบคุม การปล่อยตัวยาได้อย่างช้า ๆ ในระยะเวลาที่ต้องการให้มีการออกฤทธิ์ ในบางประเทศมีการนำเอาพลาสติกมาใช้เป็นวัสดุในการตรึงกระดูกซึ่งพบว่ามีคามยืดหยุ่นกว่าการใช้โลหะในการตรึงกระดูกนอกจากนั้นยังมีการพัฒนาพลาสติกเพื่อนำมาใช้ในการผลิตผิวหนังเทียม เช่น ในกลุ่มของคอลลาเจน และไคติน เป็นต้น เพื่อนำมาใช้ในการตกแต่งบาดแผลที่เกิดจากไฟไหม้

2) ประโยชน์ทางการเกษตร เช่น นำเอาพลาสติกมาใช้เป็นวัสดุคลุมดิน หรือนำมาใช้ในการคลุมผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอน และค่าใช้จ่ายในการเก็บ และมีการนำเอาพลาสติกมาใช้เป็นตัวควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารให้กับพืช บางประเทศมีความสนใจในการนำเอาพลาสติกมาใช้เป็นตัวปรับปรุงคุณภาพของดิน (Soil conditioner) ร่วมกับวัสดุที่สามารถ ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติชนิดอื่น ๆ นอกจากนั้นยังมีการศึกษาการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาผลิตเป็นภาชนะปลูกพืช โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการย่อยสลาย และเป็นอาหารให้กับพืชในระหว่างการเพาะปลูกด้วย

3) ประโยชน์ด้านบรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค เช่น สารเคลือบกระดาษ สำหรับห่ออาหารหรือแก้วน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง ถุงสำหรับใส่ของ ถ้วยหรือถาดย่อยสลายได้สำหรับบรรจุอาหาร สำเร็จรูป ปัจจุบันถุงพลาสติก และฟิล์มพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติกสังเคราะห์ ก่อให้เกิดปัญหาด้านขยะเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากภายหลังการใช้งานมีการนำกลับมาใช้ใหม่น้อยมาก รวมถึง

ขั้นตอนแยกพลาสติกออกจากขยะอื่นทำได้ยาก และมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้ประโยชน์ทางด้านบรรจุภัณฑ์ [33]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเคลือบกราฟีนออกไซด์เพื่อเพิ่มหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนแผ่นพลาสติกที่ยิงเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากนั้นนำไปแช่ในเมอร์แคปโตเอทิลลามีน ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NS}$) 1 ชั่วโมงเพื่อสร้างอะมิโนบนพื้นของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ จากการศึกษาลงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเซนเซอร์วัดความชื้นมีจากพลาสติกเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีดังนี้

Hesam Kamyab และคณะ ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะ และประสิทธิภาพของโพลิเมอร์ที่มีการพิมพ์ด้วยโมเลกุลที่มีคาร์บอนสำหรับการตรวจจับมลพิษที่เป็นอันตรายในสารละลายที่เป็นน้ำ โดยวัสดุที่ใช้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดยาปฏิชีวนะออกจากสารละลายน้ำ วัสดุที่มีคาร์บอนหรือถ่านกัมมันต์เป็นส่วนประกอบหลัก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพที่สุดในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำ และน้ำเสีย รวมถึงดูดซับ ตัวดูดซับที่ใช้ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด รวมทั้งของเสีย ทำให้มีต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารปนเปื้อน [34]

Andreas Schneider และคณะ ศึกษาวัสดุสำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กาวนำไฟฟ้าเงินจากอีพ็อกซี โดยคุณสมบัติของกาวเงินหรือกาวนำไฟฟ้ามีการใช้งานในด้านทางอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้กาวเงินสำหรับการเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเสื่อมสภาพของพลังงาน เนื่องจากมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ และมีความคงตัวต่อการเกิดออกซิเดชัน ถ้าเงินสัมผัสกับโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานต่างกันจะเกิดการกัดกร่อน และหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าจะลดลง [35]

Qi Wang และคณะ ศึกษาไบโอเซนเซอร์ที่ใช้กราฟีนออกไซด์เคลือบเงินหุ้มโพลิเมอร์เพื่อตรวจจับความปลอดภัยของอาหาร และตรวจสอบสภาพแวดล้อมตามการวัดการเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหของแสง ไบโอเซนเซอร์สามารถบรรจุการตรวจจับแบบเรียลไทม์ ทำซ้ำได้ และมีความไวสูงสำหรับการวิเคราะห์เป้าหมาย การสร้างเซนเซอร์กราฟีนออกไซด์เคลือบเงินจะถูกแช่ในเมอร์แคปโตเอทิลลามีน ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NS}$) ความเข้มข้นของโมเลกุล 0.1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อสร้างอะมิโนบนพื้นผิวของฟิล์มเงิน เพื่อให้มีการกระจายตัวที่ดีในพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ อีกทั้งเมอร์แคปโตเอทิลลามีนมีความสามารถในการดูดซับ และแยกออกจากสารละลายได้ง่าย ตัวดูดซับนี้สามารถลอยน้ำได้ ซึ่งไม่เพียงแต่เพิ่มตำแหน่งการดูดซับ และพื้นที่ดูดซับเท่านั้น แต่ยังจับไอออนโปรตอนได้อย่างง่าย [36]

Han Fang และคณะ ศึกษาเซนเซอร์วัดความชื้นพร้อมการตอบสนองที่รวดเร็วสำหรับการตรวจสอบการหายใจแบบเรียลไทม์ การหายใจเป็นกระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญของร่างกาย

มนุษย์ และทำหน้าที่เป็นสัญญาณสำคัญสำหรับสุขภาพส่วนบุคคล การตรวจจับความชื้นเป็นวิธีที่ดีในการตรวจสอบการหายใจโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเมื่อผู้คนหายใจ คอมโพสิตนาโนที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ ทำให้ได้ประสิทธิภาพการตรวจจับความชื้นที่ดี เมื่อเปลี่ยนความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ระหว่าง 0 ถึง 80% อุปกรณ์ของเราจะแสดงความไวสูง 52.1 Hz/%RH รูปแบบการหายใจที่แตกต่างกันสามารถแยกแยะได้ รวมถึงการหายใจปกติ การหยุดหายใจ การพูด การหายใจทางจมูก และปาก และความผันแปรของความชื้นก่อน และหลังการดื่มน้ำ แสดงให้เห็นถึงการใช้งานที่เป็นไปได้ในการวิเคราะห์สุขภาพของมนุษย์ [37]

Ying Zhang และคณะ ศึกษาคุณสมบัติที่ไวต่อความชื้นของผลึกนาโน NaTaO_3 โดยผลึกนาโน NaTaO_3 ถูกสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลอย่างง่าย และแสดงลักษณะเฉพาะโดย X-ray diffraction และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากนั้นจึงสร้างเซนเซอร์วัดความชื้น NaTaO_3 โดยการเคลือบวัสดุนาโนคริสตัลไลน์บนอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิทัล อุปกรณ์แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ดี ความเป็นเส้นตรง ความชื้นสัมพัทธ์ ฮิสเทรีซิสแคบ และลักษณะการตอบสนองของเวลาอย่างรวดเร็ว อิมพีแดนซ์จะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) เพิ่มขึ้นจาก 33% เป็น 95%RH ค่าฮิสเทรีติกสูงสุดของเซนเซอร์คือ 1%RH และเวลาตอบสนองคือ 3 s [38]

Dongzhi Zhang และคณะ ศึกษาเซนเซอร์วัดความชื้นสมรรถนะสูงพิเศษ ที่ใช้ฟิล์มนาโนคอมโพสิตกราฟีนออกไซด์ (GO) และพอลิอีเล็กโทรไลต์ (PDDA) ฟิล์มหลายชั้นถูกประดิษฐ์ขึ้นบนโพลีไมด์วัสดุพิมพ์ โดยใช้เทคนิคการประกอบเองทีละชั้น โครงสร้างของฟิล์มที่ประกอบขึ้นเองมีลักษณะเฉพาะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พฤติกรรมตรวจจับความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มถูกตรวจสอบที่อุณหภูมิห้องในช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ 11–97% การตอบสนองที่ไม่เคยมีมาก่อนสูงถึง 265, 640% แสดงให้เห็นถึงเซนเซอร์ที่น่าเสนอเมื่อสัมผัสกับระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้เซนเซอร์ที่น่าเสนอยังมีการตอบสนองที่รวดเร็วเป็นพิเศษ และสามารถตรวจสอบลมหายใจของมนุษย์ได้ [39]

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- 1) สารละลายกราฟีนออกไซด์ (GO), Sigma-Aldrich
- 2) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4), EMSURE
- 3) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4), EMSURE
- 4) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl), EMSURE
- 5) โพแทสเซียมเพอร์ไรโซยานินด์(III) ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$), Sigma-Aldrich
- 6) โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(II)ไตรไฮเดรต ($\text{K}_4(\text{Fe}(\text{CN})_6) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), Sigma- Aldrich
- 7) เมอร์แคปโตเอทิลลามีน ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NS}$), Tokyo chemical industry
- 8) ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl), Elago Enterprises
- 9) โพแทสเซียมอะซิเตท (CH_3COOK), Quality Reagent Chemical
- 10) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2), Loba Chemie
- 11) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3), Loba Chemie
- 12) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4), Quality Reagent Chemical
- 13) คอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2), Quality Reagent Chemical
- 14) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), EMSURE
- 15) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4), Quality Reagent Chemical
- 16) อะซีโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), EMSURE
- 17) โพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$), EMSURE
- 18) ไดอัลเกจ, Mitutoyo, Model 2052S
- 19) เวอร์เนียร์คาลิเปอร์, Mitutoyo, Model 505-666
- 20) เครื่องวัดแอลส์ซีอาร์ดิจิตอล (LCR Meter), Lutron, Model LCR-9063
- 21) พูรีयरทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR), Perkin Elmer, Model Spectrum One
- 22) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), JEOL, Model JSM-IT300

3.2 การดำเนินการทดลอง

การวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกการวิเคราะห์ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการตอบสนองทางไฟฟ้าของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม ส่วนที่สอง คือ การทดสอบประสิทธิภาพของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมในการวัดความชื้นสัมพัทธ์ด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว โดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ตามทฤษฎี 11% RH, 23% RH, 33% RH, 42% RH, 54% RH, 65% RH, 75% RH, 84% RH และ 97% RH ตามลำดับ มีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้

1) การเตรียมแผ่นพลาสติกจากโรงงานอุตสาหกรรม

นำแผ่นพลาสติกซึ่งเป็นของเสียจากบริษัทไฮ-เทค แอปพาวเรล จำกัด ประเทศไทย มาทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบริเวณผิวหน้าของพลาสติกที่อาจส่งผลต่อการเตรียมเซนเซอร์ โดยนำแผ่นฟิล์มพลาสติกแช่ในสารละลายอะซิโตนเป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นที่ค้างบนผิวแผ่นฟิล์ม เมื่อครบเวลานำแผ่นฟิล์มออก และนำไปแช่ต่อในสารละลายโพรพานอลเป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดสารละลายอะซิโตน จากนั้นนำกำจัดสารละลายโพรพานอลด้วยน้ำกลั่น และนำแผ่นฟิล์มไปอบให้แห้งก่อนนำไปใช้งาน [40]

2) การตรวจสอบคุณลักษณะพื้นฐานของแผ่นพลาสติก

- การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ สี ความคงตัว และความหนาของแผ่นพลาสติกด้วยไดอัลเกจ, Mitutoyo รุ่น 2052S, Japan และเวอร์เนียร์คาลิเปอร์, Mitutoyo รุ่น 505-666, Japan
- การตรวจสอบลักษณะทางเคมี เพื่อหาชนิดของแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคอินฟราเรดของแสงแบบสะท้อน (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy; ATR-FTIR)

3) การเตรียมแผ่นอิเล็กโทรด

การเตรียมแผ่นอิเล็กโทรดเริ่มจากการนำแผ่นฟิล์มพลาสติกซึ่งเป็นของเสียจากบริษัท Hi Tech Apparel ประเทศไทย ที่ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20×35 มิลลิเมตร จากนั้นใช้เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความยาวคลื่น 1060 นาโนเมตร กำลังสูงสุด 75 วัตต์ ฉายรังสีลงบนแผ่นพลาสติก ความเร็วในการสแกนของเลเซอร์ตั้งให้คงที่ 60 mm/s เพื่อให้ได้เป็นแผ่นพลาสติกเหนียวนำด้วยเลเซอร์ (Laser induced plastic) ที่มีรูปทรงที่เหมาะสม ในการศึกษานี้เลือกใช้อิเล็กโทรดเป็นแบบวงกลมเพื่อให้การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้ามีความสมบูรณ์

ต่อมานำแผ่นพลาสติกเหนียวมาด้วยเลเซอร์ที่ได้ไปแช่ในสารละลายเมอร์แคปโตเอทิลลามีน ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสร้างโครงสร้างอะมิโนสำหรับการยึดเกาะกราฟีนออกไซด์ และต่อหลอดทองแดงเข้ากับปลายแผ่นพลาสติกเหนียวมาด้วยเลเซอร์ทำเป็นแผ่นกราฟีนอิเล็กโทรดแบบวงกลม (Circle graphene electrode) ซึ่งมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่อไป

หมายเหตุ สารละลายเมอร์แคปโตเอทิลลามีน 0.1 โมลาร์ เตรียมจากการละลายเมอร์แคปโตเอทิลลามีน (C_2H_7NS) 1.9288 กรัมด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI) 250 ซีซี และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร



รูปที่ 3.1 กราฟีนอิเล็กโทรดแบบวงกลม

4) การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PSB) เตรียมจากโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) ปริมาณ 0.1135 กรัม และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ปริมาณ 35.5544 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI) 100 ซีซี จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายที่ได้เป็น ปริมาตร 1 ลิตรในขวดวัดปริมาตร จะได้เป็น PSB ที่มี pH 9 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

จากนั้นเติมโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ปริมาณ 3.7279 กรัม โพแทสเซียมเพอร์ไซยาไนด์(III) ($K_3Fe(CN)_6$) ปริมาณ 1.6411 กรัม และโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(II)ไตรไฮเดรต ($K_4(Fe(CN)_6) \cdot 3H_2O$) ปริมาณ 1.864 กรัม ลงในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PSB) และปั่น

กวนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กจนได้สารละลายสีเหลืองใสของเฟอริ-เฟอโร ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Ferri-ferro PSB) pH 9 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ดังรูปที่ 3.2 สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.2 สารละลายเฟอริ-เฟอโร ฟอสเฟตบัฟเฟอร์

5) การเตรียมกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม

เตรียมกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %w/v ตามลำดับ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PSB) pH 9 จากนั้นนำสารละลายที่ได้เข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Digital ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้กราฟีนออกไซด์ละลายตัวอย่างสมบูรณ์ในสารละลายฟอสเฟต จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปตรึงบนร่องของแผ่นกราฟีนอิเล็กโทรดแบบวงกลมที่เตรียมไว้ และทำให้แห้งจะได้เป็นกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมสำหรับการนำไปใช้งานต่อไป

หมายเหตุ การคำนวณร้อยละมวลต่อปริมาตร (%w/v) ของกราฟีนออกไซด์ ดังสมการที่ 3.1

$$\% \text{ (w/v)} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวถูกละลาย} \times 100\%}{\text{ปริมาตรสารละลาย}} \quad 3.1)$$

เช่น เตรียมกราฟีนออกไซด์ 0.5 %w/v ปริมาตร 10 มิลลิตร จะต้องใช้กราฟีนออกไซด์ ปริมาณ 50 มิลลิกรัม เมื่อคำนวณจากสมการ 3.1 ดังนี้

$$0.5\% \text{ (w/v)} = \frac{50\text{mg} \times 100\%}{10\text{ml}}$$

6) การคำนวณพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของกราฟีนออกไซด์

พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของกราฟีนออกไซด์ หมายถึงพื้นที่ผิวของของกราฟีนออกไซด์ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีทางไฟฟ้า เมื่อสารตั้งต้นมีสถานะเป็นของแข็ง คำนวณจากสมการ 3.1

$$(S) = \left(\frac{A}{m}\right) \quad 3.1$$

เมื่อ S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ

A คือ พื้นที่ผิวของทุกอนุภาครวมกัน

m คือ มวล

เมื่อ มวลของแผ่นพลาสติก $m = 0.0804 \text{ g}$

$A = 20 \times 30 \text{ mm} = 6 \text{ m}^2$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } (S) &= \left(\frac{6}{0.0804}\right) \\ &= 74.6269 \text{ m}^2/\text{g} \end{aligned}$$

7) การเตรียมสารละลายเกลืออิมิตัว

สารละลายเกลืออิมิตัวมาตรฐานสำหรับการวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวเตรียมโดยใช้ปริมาณสารละลายเกลืออิมิตัวดังตารางที่ 3.1 ละลายในน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่งเกลือไม่สามารถละลายได้อีก จากนั้นปิดฝาและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายเกลือตกผลึกจะได้สารละลายเกลืออิมิตัวที่พร้อมใช้งานในการวิเคราะห์ค่าความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 3.1 ปริมาณการเตรียมสารละลายเกลืออิมิตัว

สาร	ปริมาณสาร (g)	ปริมาตรน้ำกลั่น (mL)
ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl)	88.7	100
โพแทสเซียมอะซิเตท (CH_3COOK)	80.2	25
แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2)	235	100
โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3)	56	50
แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)	35.10	100

สาร	ปริมาณสาร (g)	ปริมาตรน้ำกลั่น (mL)
คอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2)	37.85	50
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	35.90	100
โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)	33.97	100
โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4)	2	100

8) การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม

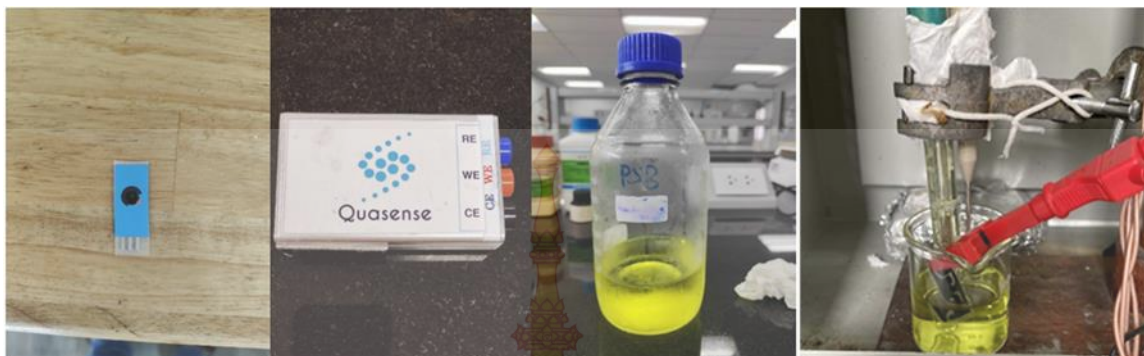
นำกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมมาตรวจสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้า โดยวัดการตอบสนองกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry; CV) โดยตั้งพารามิเตอร์เครื่องวิเคราะห์ทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

ลำดับ	รายการ	การตั้งค่า
1	Remark	Cyclic Voltammetry Potentiostatic
2	Signal Sampler	Time, WE(1).Potential, WE(1). Current
3	Options	1 Option
4	Set Potential	0.000
5	Set cell	On
6	Optimize current range	5
7	Start Potential(V)	-0.300
8	Upper Potential(V)	0.700
9	Lower Potential(V)	-0.500
10	Stop Potential(V)	0.000
11	Number of stop crossing	2
12	Step Potential(V)	0.00244
13	Scan rate	0.0250000

ในการวิเคราะห์ให้นำกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมมาต่อกับขั้ววัดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีการตั้งค่าในโหมดไซคลิกโวลแทมเมตรี ให้ปลายด้านหนึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายเฟอร์-

เฟอโร ฟอสเฟต ที่อัตราการสแกน 0.025 โวลต์ต่อวินาที เมื่อตั้งทิศทางการสแกนระหว่าง -0.5 ถึง 0.7 โวลต์ ที่ 25°C ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อแผ่นอิเล็กโทรดดัดแปลงกับขั้วไฟฟ้า
ในสารละลายเฟอโร-เฟอโร ฟอสเฟต

9) การวัดความชื้นสัมพัทธ์ด้วยกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม

นำกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมที่ให้ค่าการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าดีที่สุดมาทำการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่องวัดความต้านทานขดลวด (LCR meter) โดยใช้สารเคมีเกลืออิมิตัวเป็นตัวแทนของระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ตั้งแต่ 11 ถึง 97%

- LiCl ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 11%RH,
- CH_3COOK ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 23%,
- MgCl_2 ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 33%,
- K_2CO_3 ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 43%,
- NaBr ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 59%,
- NaCl ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 75%,
- KCl ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 84%,
- KNO_3 ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 93%,
- K_2SO_4 ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เท่ากับ 97%

10) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้อนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสง

ธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพของกำลังขยาย และการแจกแจงรายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ใช้เพื่อศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยเฉพาะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาเช่น ลักษณะรูปร่าง ลวดลายบนผิวตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ และแสดงผลออกมาเป็นภาพ 3 มิติ



บทที่ 4

ผลการวิจัย และการวิเคราะห์

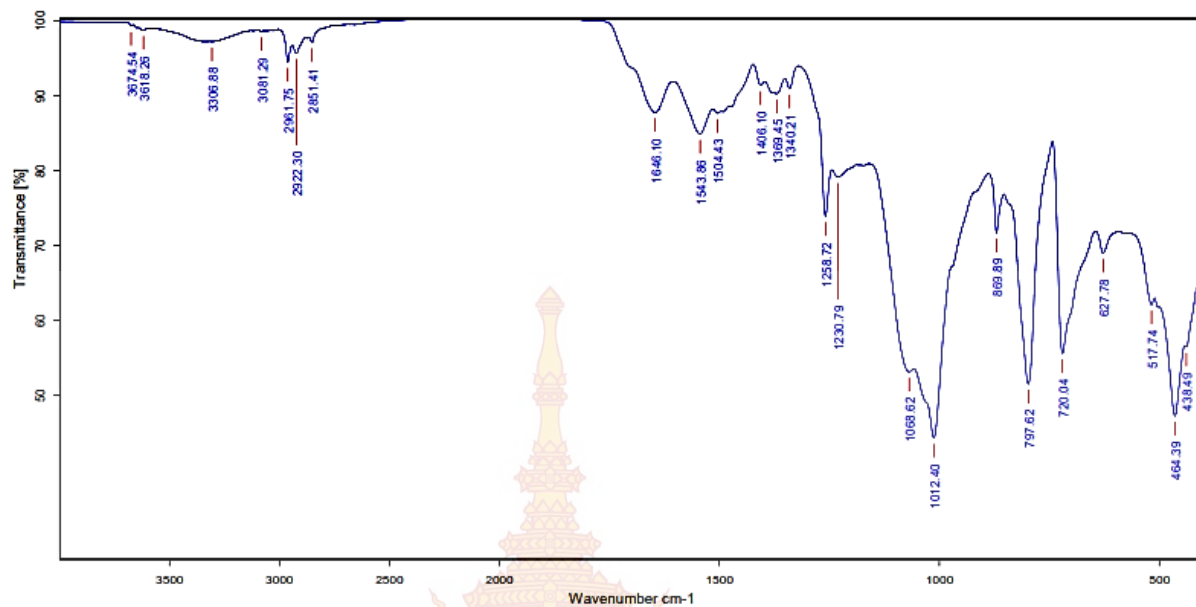
4.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะพื้นฐานของแผ่นฟิล์มพลาสติก

แผ่นฟิล์มพลาสติกจากบริษัทไฮ-เทค แอปพาวเรล จำกัด เป็นแผ่นพลาสติกที่เหลือจากการใช้งานในการกระบวนการพิมพ์แบบถ่ายโอนความร้อน (Transfer printing) มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มพลาสติกคงตัว สีขาวขุ่น มีความหนาเฉลี่ย 0.105 มิลลิเมตร เมื่อวัดด้วยไดอัลเกจ และเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

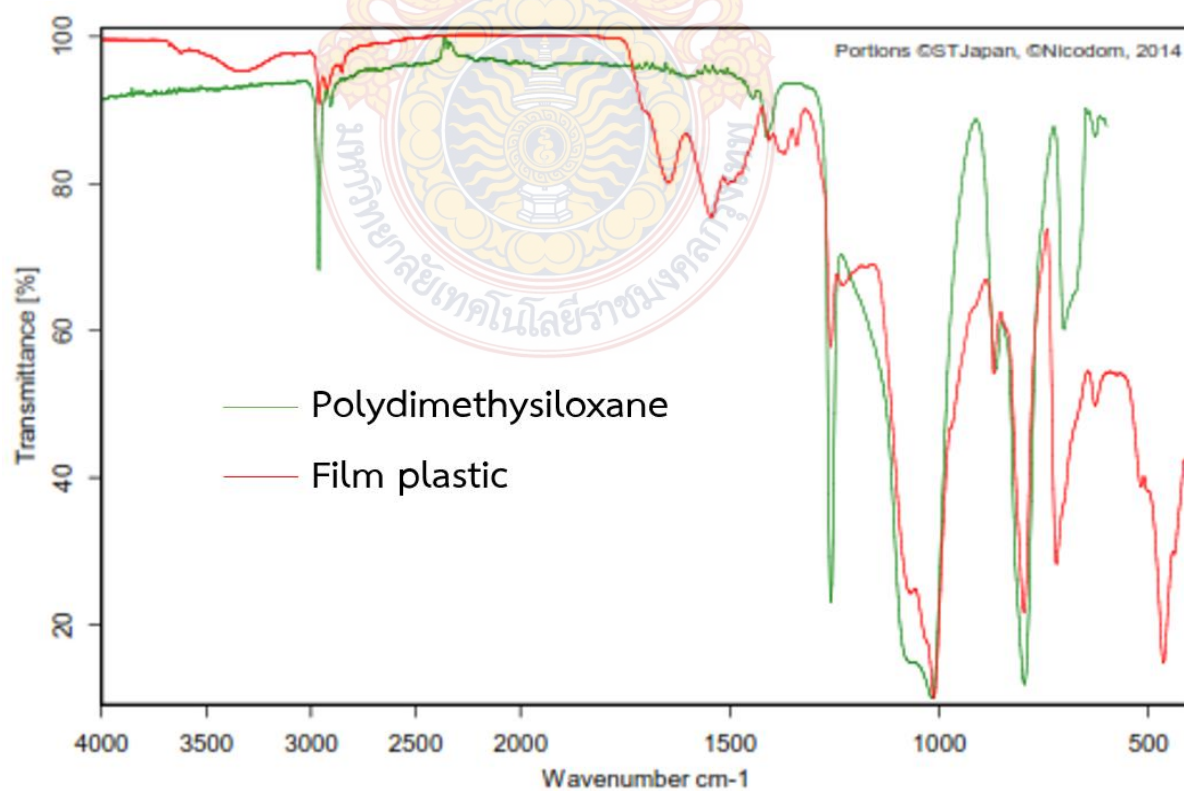


รูปที่ 4.1 การวัดความหนาแผ่นฟิล์มพลาสติก

จากนั้นนำแผ่นฟิล์มพลาสติกนี้ไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดของแสงแบบสะท้อน (ATR-FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางอินฟราเรดแบบแสงทะลุผ่านสารตัวอย่างโดยอาศัยการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรด ทำให้เกิดการสั่นของพันธะโมเลกุล เพื่อใช้ในการแยกสาร จากการวิเคราะห์พบว่าแผ่นฟิล์มพลาสติกนี้มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ชนิดพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane (PDMS) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 – 4.3



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์มพลาสติก

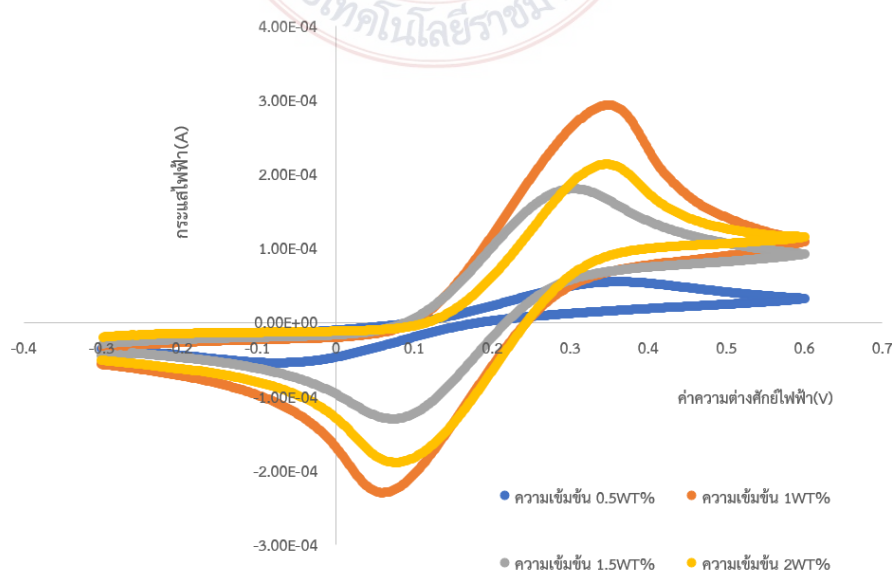


รูปที่ 4.3 การเทียบหมู่ฟังก์ชันกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน

พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มออร์กาโนซิลิกอน (Organosilicon) โดยทั่วไปจะมีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ไม่ติดไฟง่าย มีความคงตัวต่อความร้อน ร้อยละการหดตัวหลังจากได้รับความร้อนเพียงร้อยละ 1.1 มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity; k) $0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ มีความยืดตัวสูง (Elongation) ประมาณ 160% มีความโปร่งใสทางแสง สามารถทนทานต่อการกระแทกและเสียดสีได้ดี สามารถปรับแต่งพื้นผิวได้ จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทริโบอิเล็กทริกซึ่งมีสมบัติเป็นขั้วลบทางทริโบอิเล็กทริก (Negative triboelectric material) เพื่อเพิ่มผลลัพธ์ทางไฟฟ้าได้ [41-42]

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม

การพิสูจน์เอกลักษณ์การนำส่งอิเล็กตรอนของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมจากแผ่นฟิล์มพลาสติกด้วยการพิมพ์เลเซอร์ และปรับปรุงผิวด้วยกราฟีนออกไซด์ เพื่อตรวจสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry, CV) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีที่เกี่ยวข้องกับการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาของกราฟีนออกไซด์บนผิวของเซนเซอร์ในเฟอริ-เฟอโร ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 9) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จะเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron transfer reaction) บนผิวของขั้วไฟฟ้า ในการวิจัยนี้ไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าแบบรอบจาก -0.30 โวลต์ ถึง 0.6 โวลต์ อัตราสแกน 0.025 โวลต์ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 25°C เมื่อกำหนดค่าความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.50 และ 2.0 %w/v ตามลำดับผลการศึกษาดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม

จากรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่ากราฟีนออกไซด์เป็นสารตัวกลางสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีสังเกตจากลักษณะของรูปทรงของกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ชัดเจน เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนดีมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือสภาพคล่องมีมากถึง $200,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ มีความยืดหยุ่นสูง [43] จึงสามารถนำมาใช้เป็นกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมในการวิจัยนี้ได้

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ความเข้มข้นกราฟีนออกไซด์ $0.5\% \text{w/v}$ จะมีค่าต้านทานสูงสุด โดยพิจารณาจากลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นจะมีรูปทรงที่แคบเมื่อเทียบกับกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นอื่น และค่าการนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ทั้งหมดจะอยู่ระหว่าง $-0.0000231 - 0.000293$ แอมแปร์ โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่ของกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น $1\% \text{w/v}$ จะมีค่าที่สูงกว่า $0.5\% \text{w/v}$ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น $1.5\% \text{w/v}$ และ $2.0\% \text{w/v}$ กลับพบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำลง เนื่องจากการใช้กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชั้นความหนาของโมเลกุลกราฟีนออกไซด์ปกคลุมผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จนทำให้เกิดการขัดขวางการนำส่งอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าไฟฟ้า [44] ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้กราฟีนออกไซด์ความเข้มข้น $1.0\% \text{w/v}$ ที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดแล้วการทดลองการหาค่าความชื้นต่อไป

4.3 ผลการวัดความชื้นสัมพัทธ์ด้วยกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม

งานวิจัยนี้เป็นการวัดค่าความชื้นของตัวแผ่นกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์จากสารเคมีประเภทเกลืออิ่มตัว ด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter) ที่ค่าความถี่ 100, 120, 1000, 10,000 และ 100,000 Hz ตามลำดับ ผลการศึกษาดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความจุไฟฟ้าจากการวัดด้วย LCR meter ที่ความถี่ต่าง ๆ

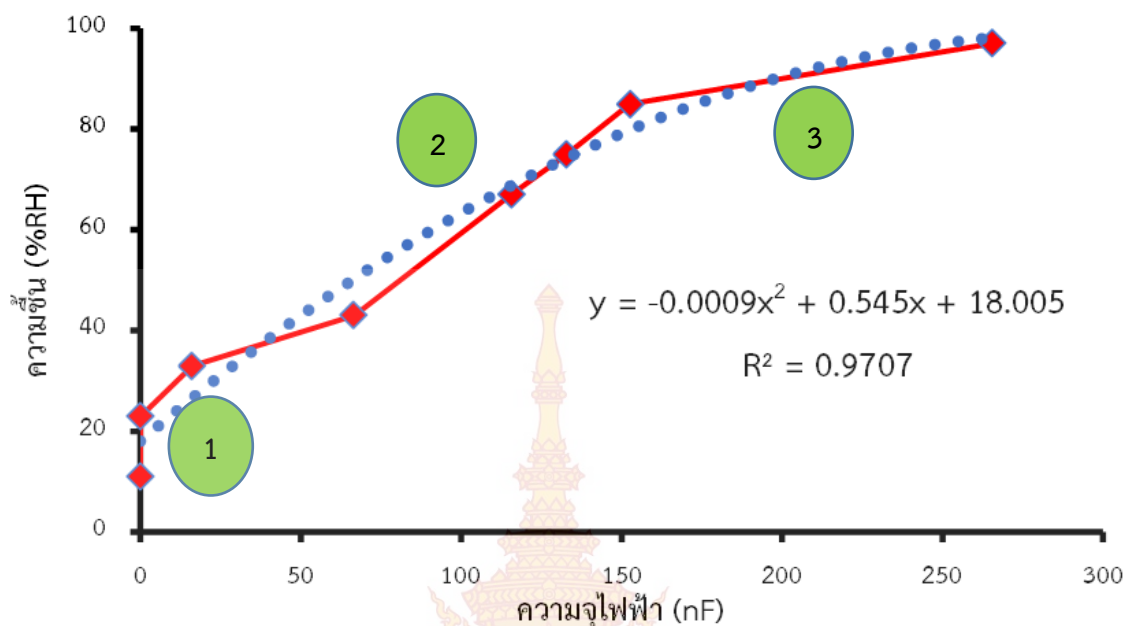
ความชื้น (%RH)	ความจุไฟฟ้า (nF)				
	100 Hz	120 Hz	1,000 Hz	10,000 Hz	100,000 Hz
11	0.0258	0.0222	0.0101	0.0536	0.0378
23	0.0790	0.0740	0.0518	0.0350	0.0312
33	16.2780	14.6890	16.1642	4.9240	0.6762
43	66.7000	105.8000	65.7100	9.4210	1.7969
67	115.7000	107.6300	74.6600	12.3520	2.0199

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ความชื้น (%RH)	ความจุไฟฟ้า (nF)				
	100 Hz	120 Hz	1,000 Hz	10,000 Hz	100,000 Hz
75	133.0800	127.0700	82.5850	19.3210	2.1253
85	152.4900	135.5500	85.2900	21.3560	2.8020
97	265.6000	251.4000	94.3500	22.3610	1.0531
R ²	0.9707	0.8942	0.9420	0.9616	0.5849

เครื่องวัด LCR เป็นเครื่องมือวัดทางด้านไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์ ใช้หลักการวัดอิมพีแดนซ์ หรือการต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ซึ่งเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของปริมาณสเกลาร์ 2 ตัว คือ ค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ โดยค่ารีแอคแตนซ์เป็นความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้า โดยการวัดแรงดัน (V) ตกคร่อม, กระแส (I) ที่ไหลผ่าน และมุมเฟสที่แตกต่างระหว่างแรงดันและกระแส ค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ที่สำคัญมี 3 แฟกเตอร์ ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (แอล: L), ตัวเก็บประจุ (ซี: C) และ ตัวต้านทาน (อาร์: R) ในการใช้งาน LCR meter เพื่อให้ผลการวัดที่มีประสิทธิภาพต้องมีการเลือกใช้ความถี่ทดสอบที่ใกล้เคียงกับความถี่ของอุปกรณ์ที่ใช้งาน [45-46]

จากการวิจัยพบว่าค่าความถี่ LCR meter ทุกย่านการทดสอบให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความชื้นสัมพันธ์ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสอง (Polynomial 2nd power) เช่นเดียวกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นยางดิบ [47] และยางพารา [48] เมื่อพิจารณาความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง (R-squared; R²) พบว่าที่ความถี่ 100 Hz ให้ค่า R² หรือความแม่นยำในการวัดจากความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นสัมพันธ์มากที่สุด ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความถี่ 100 Hz ของเครื่อง LCR เป็นตัวแทนในการหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ต่อไป มีผลการศึกษาดังรูปที่ 4.5

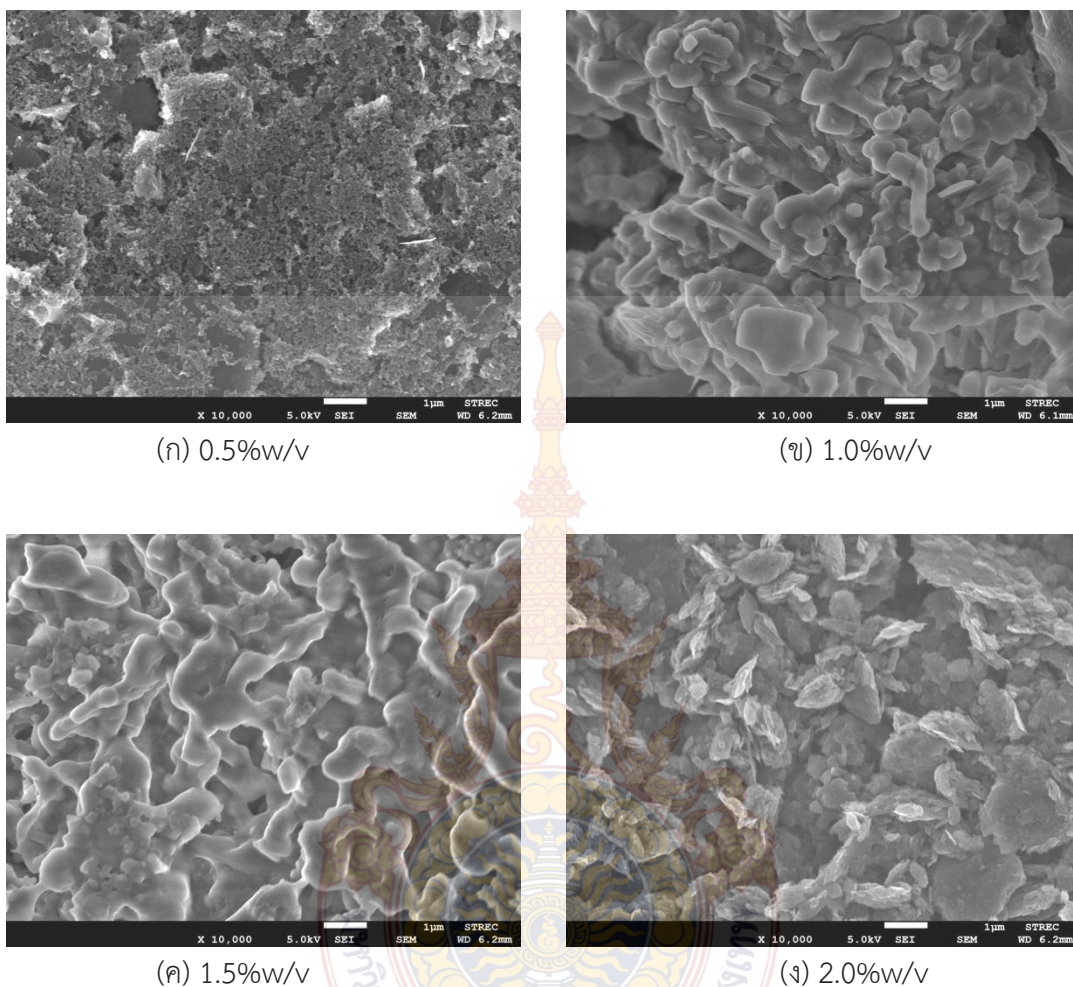


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความชื้น

จากรูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นบนกราฟินอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงขึ้น เป็นไปตามสมการพหุนามกำลังสองคือ $y = -0.0009x^2 + 0.545x + 18.005$ และ $R^2 = 0.9707$ สามารถอธิบายความสัมพันธ์เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ในช่วงความชื้นต่ำ กราฟิโนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าจนไม่สามารถแยกช่วงความชื้นได้ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นระยะที่ 2 ความชื้นปานกลางกราฟิโนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมมีลักษณะเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้กระแสที่ไหลผ่านที่ดีสามารถจำแนกความชื้นออกมาได้อย่างชัดเจน และเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นถึงระยะที่ 3 ค่ากระแสไฟฟ้าจะเริ่มคงที่ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [47-48]

4.5 ผลการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของกราฟิโนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลม

จากการศึกษาพื้นผิวของกราฟิโนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ความเข้มข้นของกราฟิโนออกไซด์ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2%w/v ตามลำดับ ให้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรดดัดแปร
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะพื้นผิวของของแผ่นอิเล็กโทรดดัดแปร มีลักษณะเป็นหกลเหลี่ยมซ้อนติดกันเป็นชั้นกระจายตัวบนขั้วไฟฟ้าจากแผ่นพลาสติก และมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ กราฟีนออกไซด์สอดคล้องกับงานวิจัยของ จุฬาลักษณ์ คำพะธิก และคณะ [44]

จากนั้นนำตัวอย่างไปคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของกราฟีนที่ทำปฏิกิริยา โดยใช้ความเข้มข้น 1.0%w/v เป็นตัวแทนการศึกษา พบว่ากราฟีนออกไซด์ที่นำมาใช้ในการวิจัยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 74.6269 ตารางเมตรต่อกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายหลักในการลดปัญหาขยะอุตสาหกรรม และเพิ่มมูลค่าให้แก่ขยะอุตสาหกรรม ประเภทแผ่นพลาสติก โดยนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบเซนเซอร์วัดความชื้น จากนั้นทำการวิเคราะห์ ทดสอบลักษณะผลิตภัณฑ์ต้นแบบ และทดสอบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

จากผลการวิจัยพบว่าแผ่นฟิล์มพลาสติกจากโรงงานอุตสาหกรรมนี้มีความหนาเฉลี่ย 0.105 มิลลิเมตร เป็นแผ่นพลาสติกประเภทพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) จัดอยู่ในกลุ่มออร์กาโนซิลิกอนพอลิเมอร์ สามารถนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบเซนเซอร์วัดความชื้นจากแผ่นฟิล์มพลาสติกเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากแผ่นพลาสติกนี้มีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี มีความคงตัวต่อความร้อน ทนทานต่อการกระแทกและเสียดสีได้ดี ไม่ติดไฟง่าย มีความโปร่งใส สามารถปรับแต่งพื้นผิวได้ นำมาพัฒนาเป็นกราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมใช้ในการวัดความชื้นได้ จากการเตรียมด้วยการสกรีนเลเซอร์ และเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า และความร้อนที่ดีเมื่อใช้กราฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 1.0%w/v

กราฟีนอิเล็กโทรดเซนเซอร์แบบวงกลมสามารถนำไปใช้เป็นเซนเซอร์ในการวัดความชื้นสัมพัทธ์จากบรรยากาศได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์ จากการศึกษาพบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงขึ้น ตามสมการพหุนามกำลังสองคือ $y = -0.0009x^2 + 0.545x + 18.005$ และมีค่า $R^2 = 0.9707$

เมื่อนำแผ่นพลาสติกไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าอนุภาคกราฟีนออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นพลาสติกจะมีรูปทรงเป็นหกเหลี่ยมซ้อนชิดติดกัน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 74.6269 ตารางเมตรต่อกรัม

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าแผ่นพลาสติกจากไฮ-เทค แอปพาเรล จำกัด สามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยการนำไปพัฒนาเป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจจับความชื้นได้ สามารถนำไปประยุกต์ และพัฒนาต่อยอดเพื่อการใช้งานในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] บริษัท วงษ์พาณิชย์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด, ม.บ.ป. ราคากลางรับซื้อขยะวันนี้ [ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2565, จาก <https://www.wongpanit.com/>
- [2] H.Luo และ B. Gao, 2021. Development of smart wearable sensors for life Healthcare, **Engineered Regeneration**, 2, 163-170.
- [3] อัญชลี สำเภา, ม.บ.ป. ไบโอดีเซนเซอร์ การสร้าง การทำงาน และประโยชน์ของไบโอดีเซนเซอร์ [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 19 กุมภาพันธ์ 2565, จาก https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/254_13-18.pdf.
- [4] H.M. Yousaf et al., 2020. Highly sensitive wide range linear integrated temperature compensated humidity sensors fabricated using Electrohydrodynamic printing and electrospray deposition, **Sensors and Actuators B: Chemical**. 308, 127- 680.
- [5] A. Beniwal et al., 2022. Screen-printed graphene-carbon ink based disposable humidity sensor with wireless communication, **Sensors and Actuators B: Chemical**. 1, 132-137.
- [6] L.Zhou et al., 2021, High-performance humidity sensor based on graphitic carbon nitride/ polyethylene oxide and construction of sensor array for non-contact humidity detection, **Sensors and Actuators: B. Chemical**. 344, 130-219.
- [7] C.Kwak et al., 2020, Surface modification of carbon materials and its application as adsorbents, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. 344, 235-245.
- [8] M.Braungart และ W.McDonough, 2002, **Cradle to cradle: Remaking the way we make things**, Vintage books 2nd ed., United Kingdom.
- [9] S. Intrachooto, 2013. **Upcycling**. NSTDA. ปทุมธานี, ประเทศไทย.
- [10] InfoQuest Limited, 2020. อาติตาส ปลดล็อกอนาคตแห่งวงการกีฬา ด้วย FUTURECRAFT.LOOP รองเท้าวิ่งที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลใหม่ได้ [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 8 กันยายน 2565, จาก https://mma.prnewswire.com/media/873022/adidas_FUTURECRAFT_LOOP_recycling.jpg
- [11] SMILE Resource Exchange. 2022. **Trash or treasure? survey results indicate**

- upcycling is becoming the growing green trend [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2565, จาก <http://www.smileexchange.ie/news/trash-ortreasure-survey-results-indicate-upcycling-is-becoming-the-growing>
- [12] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ, 2565, **SENORTECHNOLOGY** [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 8 กรกฎาคม 2565, จาก <https://www.stkc.go.th>.
- [13] บริษัทยูนิตี้ อินโนเวชั่น, ม.บ.ป. **Sensor – อุปกรณ์ที่ควบคู่กับงานอัตโนมัติ** [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 8 กรกฎาคม 2565, จาก <https://fedagate.com>.
- [14] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.), 2022, **เทคโนโลยีเซนเซอร์กับเกษตรกรรม** [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2565, จาก <http://horizon.sti.or.th/node/56>.
- [15] เทคโนโลยีและนวัตกรรมทางเกษตร. 2560. **เซนเซอร์วัดสภาพดินเพาะปลูกพืชผลทางการเกษตรแบบดิจิทัล** [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2565, จาก <https://electrohoya.blogspot.com/2017/06/plat-smart.html?m=1>.
- [16] โชติพงศ์ กาญจนประโชติ. ม.บ.ป. **ระบบเซ็นเซอร์ เพื่อการเกษตร** [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2565, จาก <https://www.blockdit.com>.
- [17] โสภกา กลิ่นจันทร์. 2001. **ไบโอเซนเซอร์กับการประยุกต์ใช้**. เอกสารประกอบการสอนวิชา เทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ประเทศไทย.
- [18] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. ม.บ.ป. **Biosensor/ไบโอเซนเซอร์** [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 8 กรกฎาคม 2565, จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3010/biosensor>.
- [19] T.Yang et al., 2018. Two-dimensional material functional devices enabled by direct laser fabrication. **Front. Optoelectron.** 11(1): 2–22. doi.org/10.1007/s12200-017-0753-1
- [20] EL-Kady และ Kaner, 2014. Direct Laser Writing of Graphene Electronics. **ACS Nano.** 8(9), 8725–8729.
- [21] Z. Wan et al. 2020. Laser induced graphene for biosensors. **Sustainable Materials and Technologies**, 25, doi.org/10.1016/j.susmat.2020. e00205

- [22] มาโนทย์ มาปะโท. 2550. การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงโดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ประเทศไทย.
- [23] สมหวัง อริสริยวงศ์. 2553. **ต้นแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการตรวจวัดสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน A Wireless Sensor Network Prototype for Environmental Monitoring in Greenhouses.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, นครนายก, ประเทศไทย.
- [24] ณัฐดนัย เนียมทอง. 2561. การวัดค่าความชื้นในอากาศ [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 8 กรกฎาคม 2565, จาก <https://www.scimath.org>.
- [25] บริษัท เลกะ คอร์ปอเรชั่น จำกัด. ม.บ.ป. **ความชื้นในอากาศที่เหมาะสม กับร่างกาย [ออนไลน์]**, สืบค้นเมื่อ 8 กรกฎาคม 2565, จาก <https://legatool.com/wp/10833/>.
- [26] บริษัท นีโอนิคส์ จำกัด. 2022. **หน่วยวัดความชื้น (Unit of moisture) [ออนไลน์]**, สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2565 จาก <https://www.tools.in.th/moisture-and-humidity/unit-of-moisture/>
- [27] สุริชัย ภัทรกิจนรินทร์ และ รวี งามโชคชัยเจริญ. ม.บ.ป. **มารู้จักกับ Psychrometric Chart กันเถอะ [ออนไลน์]**, สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2565 จาก https://www.acat.or.th/download/acat_or_th/journal-8/08%20-%2007.pdf
- [28] ธาณินทร์ แดงกวารัมย์. 2554. **การประดิษฐ์ไมโครเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดตะกั่วสำหรับงานภาคสนามในน้ำผิ้ว ในเขตอำเภอแมริม จังหวัดเชียงใหม่**, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, ประเทศไทย.
- [29] ธาณินทร์ แดงกวารัมย์ และมาโนชย์ ถนอมวงศ์, 2556. **การพัฒนาเคมีคอลเซนเซอร์สำหรับวัดตะกั่วในน้ำผิ้วด้วยขั้วไฟฟ้าบิสมัทอะมัลกัม-ท่อคาร์บอนนาโนปรับแต่งด้วยไคโตซานแบบเชื่อมไขว้**.รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, ประเทศไทย.
- [30] นิชชา บุณยสิงห์. ม.บ.ป. **ขยะพลาสติก [ออนไลน์]**, สืบค้นเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2565 จาก www.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/parliament_parcy/ewt_dt_link.php?nid=58603&filename=index.
- [31] เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน, 2017, **พลาสติกคืออะไร [ออนไลน์]**, สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2565 จาก <https://www.mtec.or.th/bio-plastic/index.html>.
- [32] ศุภพร แสงกระจ่าง, ปัทมา พลอยสว่าง, ปรีณดา พรหมพิตร. 2556. ผลกระทบของพลาสติกต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม, **วารสารพิษวิทยาไทย**. 28(1), 5-7.

- [33] P.Krasucka et al., 2020. A sustainable solution for the removal of antibiotics from water, **Engineered biochar**. 405, 126-962.
- [34] H. Kamyab et al., 2022. A review on carbon-based molecularly-imprinted polymers (CBMIP) for detection of hazardous pollutants in aqueous solutions. **Chemosphere**. 308., 136-471.
- [35] A. Schneider et al., 2014. Comprehensive study of material dependency for silver based conductive glues, **Energy Procedia**. 55., 509-518.
- [36] Qi Wang และ Bo Wang. 2018. Surface plasmon resonance biosensor based on graphene oxide/silver coated polymer cladding silica fiber, **Sensors and Actuators B: Chemical**. 275., 332-338.
- [37] H. Fang et al., 2020. Cu(OH)₂ nanowires/graphene oxide composites based QCM humidity sensor with fast-response for real-time respiration monitoring, **Sensors and Actuators B: Chemical**. 304., 127-313.
- [38] Y. Zhang et al., 2012. A novel humidity sensor based on NaTaO₃ nanocrystalline, **Sensors and Actuators B: Chemical**. 174., 485-489.
- [39] D. Zhang et al., 2014, Ultrahigh performance humidity sensor based on layer-by-layer self-assembly of graphene oxide/polyelectrolyte nanocomposite film, **Sensors and Actuators B: Chemical**. 203., 263-270.
- [40] A. Rivadeneyra et al., 2014, Design and characterization of a low thermal drift capacitive humidity sensor by inkjet-printing. **Sensors and Actuator B: Chemical**, 195., 123-131
- [41] ปวรปรัชญ์ ฤๅชา และ วิยะดา หาญชนะ, 2564, การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกด้วยวิธีการปรับปรุงลักษณะพื้นผิวของวัสดุพอลิไธเมทิลไซลอกเซน, ในการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ประเทศไทย.
- [42] K.Bruce et al., 2016, Low-Cost MEMS Technologies, **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, 341-378.
- [43] แมนมนัส ศรีแก้ว และสายันต์ แสงสุวรรณ, 2563, วัสดุท่อนำความร้อนแกรไฟน์: กลยุทธ์การสังเคราะห์สมบัติการพัฒนา การพิสูจน์เอกลักษณ์และการประยุกต์ใช้, **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**, 22(2); 39-49.

- [44] จุฬาลักษณ์ คำพะอิก และคณะ, 2562, การพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์โดยใช้ฮีมินปรับปรุงบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนคาร์บอนเพื่อตรวจวัดอาร์ทีมิซินิน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 21(2); 171-180.
- [45] บริษัท เลกะ คอร์ปอเรชั่น จำกัด, 2022, รีวิว LCR Meter เครื่องวัดแอลซีอาร์ [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 8 ธันวาคม 2565, จาก <https://legatool.com/wp/5656/>
- [46] บริษัท เอปียอลเทคโนโลยี จำกัด, 2022, หลักการพื้นฐานของ LCR Meter [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 8 ธันวาคม 2565, จาก <https://www.aballtechno.com/article/81/lcr-meter>
- [47] นภัส ทองประไพ และคณะ, 2557, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นยางดิบ, ในการประชุมการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ประเทศไทย.
- [48] คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์ และ ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์, 2560, การพัฒนาเครื่องวัดความชื้นไม้ยางพาราด้วยอินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, ประเทศไทย.

