

การอัปเดตเซลล์พลาสติกจากโรงงานเป็นอิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์วัดความชื้น

กาญจนา ลือพงษ์^{1*} เลิศลักษณ์ แก้ววิมล¹ และ เสาวณีย์ อาริวงเจริญ²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹² ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

²⁵¹⁷ ถนนนครสวรรค์ แขวงสวนจิตรลดา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

รับบทความ 15 พฤษภาคม 2566 แก้ไขบทความ 8 พฤศจิกายน 2566 ตอรับบทความ 30 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ

การอัปเดตเซลล์พลาสติกที่ใช้แล้วจากโรงงานให้กลายเป็นอิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์วัดความชื้นมีจุดประสงค์หลักในการนำขยะพลาสติกจากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่โดยการเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณขยะพลาสติก โดยพัฒนาเป็นอิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์ที่มีความสามารถในการตรวจวัดความชื้น โดยเริ่มจากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและเคมีของแผ่นฟิล์ม จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ร้อยละ น้ำหนักต่อปริมาตร และศึกษาสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์ทั้งในด้านการตอบสนองทางไฟฟ้าโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี สันฐานวิทยา พื้นที่ผิวจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยาของกราฟีนออกไซด์เซ็นเซอร์ และหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์สำหรับการตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ ผลการศึกษาพบว่าแผ่นฟิล์มพลาสติกจากโรงงานเป็นซิลิโคนประเภทพอลิไดเมทิลซิลอกเซนมีความหนา 0.105 มิลลิเมตร มีความยืดหยุ่นสามารถปรับแต่งพื้นผิวได้ สามารถสกรีนเลเซอร์ และเคลือบกราฟีนออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1.0 ร้อยละน้ำหนักต่อปริมาตร เซ็นเซอร์ที่ได้มีสมบัติด้านการนำไฟฟ้า และสามารถพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์ในการวัดขึ้นจากบรรยากาศได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ (x) และความจุไฟฟ้า (y) ตามสมการพหุนามกำลังสองคือ $y = 0.0013x^2 + 2.7902x - 51.17$ ที่ค่า $R^2 = 0.971$ อนุภาคกราฟีนออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นฟิล์มจะมีรูปทรงเป็นหกเหลี่ยมซ้อนชิดติดกัน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 74.6269 ตารางมิลลิเมตรต่อกรัม

คำสำคัญ : อัปเดตเซลล์; พอลิไดเมทิลซิลอกเซน; อิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์; กราฟีนออกไซด์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9994 5959, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: : kanchana.l@mail.rmutk.ac.th

Upcycling of the Used-Factory Film Sheets to Electrochemical Humidity Sensor

Kanchana Luepong^{1*} Lerdluck Kaewwimol¹ and Saowanee Areechongchareon²

¹Engineering Faculty, Rajamangala University of Technology Krungthep

²Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

¹2 Nang linchi Road, Thung Maha Mek, Sathorn, Bangkok, 10120

²517 Nakhonsawan Road, Suan Chitralada, Dusit, Bangkok, 10300

Received 15 May 2023; Revised 8 November 2023; Accepted 30 November 2023

Abstract

The primary objective of this study was to upcycle used factory film sheets, thereby adding value to these materials and mitigating the accumulation of industrial waste. Specifically, our research focused on developing an electrochemical sensor for humidity measurement. Initially, the plastic sheets underwent a comprehensive analysis of their physical and chemical properties. Subsequently, they were coated with graphene oxide at varying concentrations (0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0% w/v) to investigate the electrical response of the electrochemical sensor using cyclic voltammetry. Humidity measurements were conducted using the LCR meter based on the electric method. The study revealed that the waste film sheets were of Polydimethylsiloxane type, with a thickness of 0.105 mm, showcasing flexibility and suitability for surface modification through laser screening. To enhance the conductivity properties, the electrochemical sensor was coated with 1.0% w/v graphene oxide. This modification enabled accurate humidity measurements, establishing a relationship between humidity (x) and electric capacity (y) through a second-degree polynomial equation: $y = 0.0013x^2 + 2.7902x - 51.17$, with an R^2 value of 0.971. Furthermore, the morphology analysis of the graphene oxide on the modified sensor surface revealed a stacked configuration with a hexagonal shape. The specific surface area of graphene oxide was calculated to be 74.6269 square millimeters per gram. This innovative approach not only showcases the flexibility and adaptability of Polydimethylsiloxane-based film sheets but also demonstrates the potential of graphene oxide coatings in developing efficient and reliable humidity sensors, contributing significantly to the field of environmental sustainability and sensor technology.

Keywords: Upcycle; Polydimethylsiloxane; Electrochemical sensor; Graphene oxide

** Corresponding Author. Tel.: +668 9994 5959, E-mail Address: kanchana.l@mail.rmutk.ac.th*

1. บทนำ

จากนโยบายการพัฒนาประเทศไทยด้วยการขับเคลื่อนตามโมเดลเศรษฐกิจ (BCG Model) เป็นการพัฒนาเศรษฐกิจที่สำคัญใน 3 ด้านได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bio economy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green economy) เป้าหมายที่สำคัญคือการลดใช้ทรัพยากรด้วยการหมุนเวียนทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยเฉพาะการนำขยะจากภาคอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีขยะที่เกิดจากกระบวนการผลิตที่หลากหลายรูปแบบทั้งในรูปแบบเส้นใยสังเคราะห์ พิล์ม แผ่นพลาสติก และแผ่นยางซิลิโคนกลับมาใช้ใหม่ด้วยการรีไซเคิล หรืออัพไซเคิลเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ [1] ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่มีการนำแผ่นฟิล์มแบบต่าง ๆ ไปใช้งานเป็นเซนเซอร์ โดยเฉพาะเซนเซอร์ทางไฟฟ้าเคมี หรืออิเล็กโตรเคมีคัลเซนเซอร์ (Electrochemical sensor)

อิเล็กโตรเคมีคัลเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าในการทดสอบสมบัติ ความเสถียร และการเกิดปฏิกิริยา ด้วยการตรวจจับและแปลงข้อมูลเฉพาะทางเคมีที่เกิดขึ้นให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า [2]-[6] ที่สามารถแสดงค่าทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้ ตัวตรวจจับ ประเภทกราฟีนออกไซด์ นิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเนื่องจากโครงสร้างที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง [5] ร่วมกับเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic-voltammetry; C-V) ปัจจุบันมีงานวิจัยหลากหลายสาขาที่พัฒนาเซนเซอร์ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานค่อนข้างสูง สามารถตอบสนองการทำงานได้อย่างรวดเร็ว มีความถูกต้องและแม่นยำ [4], [6]-[9] ทดแทนวิธีวิเคราะห์แบบดั้งเดิมที่ต้องใช้เครื่องมือราคาแพงในการผลิต เซนเซอร์ที่พัฒนาได้สามารถนำไปใช้ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารตามหลักการวิเคราะห์ทั้งทางตรง หรือทางอ้อมเช่น เซนเซอร์ความชื้น และเซนเซอร์ก๊าซ ทำงานโดยอาศัยกลไกการตรวจจับความ

ต้านทานทางไฟฟ้า และข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณไอน้ำหรือก๊าซที่มีอยู่ในบรรยากาศไม่ว่าจะเป็นปริมาณสัมบูรณ์หรือปริมาณสัมพัทธ์ของจุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิหนึ่ง [10] สำหรับการวัดความชื้นในยางดิบ [12] ยางพารา [13] และไบโอเซนเซอร์ในการหาสารประกอบเคออสตินในน้ำผลไม้ [14] ปริมาณสารอาร์ทิมีซินิน [7]

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาอิเล็กโตรเคมีคัลเซนเซอร์จากขยะเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจจับด้วยกราฟีนออกไซด์ โดยอาศัยสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดจากกราฟีนออกไซด์ในการตรวจวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุและสารเคมี

งานวิจัยนี้ใช้แผ่นฟิล์มบางที่มีลักษณะเรียบ มีความโค้งงอคล้ายแผ่นพลาสติกจากโรงงานสิ่งทอขนาดใหญ่แห่งหนึ่งในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นขยะที่เกิดจากกระบวนการสร้างลวดลายบนเสื้อผ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบถ่ายโอน (Transfer printing) แผ่นฟิล์มเหล่านี้ก่อนนำมาวิจัยต้องนำไปทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบริเวณผิวหน้า ด้วยการนำไปแช่ในสารละลายอะซิโตน (C_3H_6O , MERCK) เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดฝุ่น และไขมันบนผิวหน้า จากนั้นนำไปแช่ต่อในสารละลายโพรพานอล (C_3H_8O , MERCK) เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดสารละลายอะซิโตน เมื่อครบเวลานำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $50-60^{\circ}C$ ก่อนนำไปใช้งาน [15]

นอกจากนี้ในการทดลองยังใช้สารละลายกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide; GO, Sigma-Aldrich) มอร์แคปโตเอทิลลามีน (C_2H_7NS , Tokyo chemical industry) และเตรียมสารละลายเฟอร์ริ-เฟอร์โร ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Ferri-ferro phosphate buffer) จากโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4 , MERCK) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4 , MERCK) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl,

MERCK) โพแทสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์(III) ($K_3Fe(CN)_6$ MERCK) โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์ต(II) ไตรไฮเดรต ($K_4(Fe(CN)_6) \cdot 3H_2O$) สารเคมีเหล่านี้สามารถนำมาใช้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์สำหรับการนำมาใช้ในการเตรียมกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์

2.2 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

แผ่นฟิล์มนี้นำมาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยการประเมินความหนาด้วยไดอัลเกจ, Mitutoyo รุ่น 2052S, Japan และตรวจสอบประเมินค่าสี (Color coordinate) ตามมาตรฐาน CIE Lab scale ($L^* a^* b^*$) เมื่อ L^* แทนค่าความมืด-ความสว่าง a^* แทนค่าสีแดง-สีเขียว b^* แทนค่าสีเหลือง-น้ำเงิน ด้วยเครื่อง Spectraflash รุ่น SF600 PLUS-CT, Datacolor international, USA กำหนดให้ D65 เป็นแหล่งกำเนิดแสง ที่มุมมอง 10 องศา

2.3 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของแผ่นพลาสติก

การตรวจสอบลักษณะทางเคมีของแผ่นฟิล์มเทียบกับข้อมูลมาตรฐานเพื่อหาชนิดของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์อินฟราเรดในโหมดการให้แสงสะท้อน (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy; ATR-FTIR) รุ่น Spectrum One, Perkin Elmer, USA เทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างด้วยอินฟราเรดแบบแสงทะลุผ่านสารตัวอย่าง โดยอาศัยการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟรา-เรดทำให้เกิดการสั่นของพันธะโมเลกุลในการแยกหมู่ฟังก์ชัน

2.4 การพัฒนาอิเล็กโทรเคมีคัลเซนเซอร์

2.4.1 การเตรียมแผ่นอิเล็กโทรด

แผ่นอิเล็กโทรดเตรียมจากนำแผ่นฟิล์มที่ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20×35 มิลลิเมตร จากนั้นใช้เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความยาวคลื่น 1060

นาโนเมตร กำลังสูงสุด 75 วัตต์ ฉายรังสีลงบนแผ่นพลาสติก ความเร็วในการสแกนของเลเซอร์ตั้งให้คงที่ 60 mm/s เพื่อให้ได้เป็นแผ่นพลาสติกเหนียวนำด้วยเลเซอร์ (Laser induced plastic) ที่มีรูปทรงที่เหมาะสม [2], [16] การศึกษานี้เลือกเตรียมเป็นอิเล็กโทรดแบบวงกลมเพื่อให้การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้ามีความสมบูรณ์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อิเล็กโทรดแบบวงกลม

จากนั้นนำแผ่นฟิล์มเหนียวนำด้วยเลเซอร์ที่ได้ไปแช่ในสารละลายเมอร์แคปโตเอทิลลามีน ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสร้างโครงสร้างอะมิโนสำหรับการยัดเกาะกราฟีนออกไซด์ และต่อลวดทองแดงเข้ากับปลายแผ่นพลาสติกเหนียวนำด้วยเลเซอร์ทำเป็นแผ่นอิเล็กโทรดแบบวงกลม (Circle electrode) ซึ่งมีความสามารถในการนำไฟฟ้า สำหรับสารละลายเมอร์แคปโตเอทิลลามีน 0.1 โมลาร์นั้นเตรียมได้จากการละลายเมอร์แคปโตเอทิลลามีน (C_2H_7NS ; MERCK) 1.9288 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI) 250 ซีซี และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร

2.4.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์

เตรียมกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %w/v ตามลำดับ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PSB) pH 9 จากนั้นนำสารละลายที่ได้เข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Digital ultrasonic cleaner) รุ่น GT SONIC-D13, Guangdong GT Ultrasonic, China เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้กราฟีนออกไซด์ละลายอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปตรึงบนร่องของแผ่นอิเล็กโทรดแบบวงกลมที่เตรียมไว้ และทำให้แห้งจะได้

กราฟีนออกไซด์เซนเซอร์ที่พร้อมใช้งาน สารละลาย บัฟเฟอร์ในการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 1. สารละลาย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PSB) pH 9 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เตรียมจากโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4 ; Sigma-Aldrich) ปริมาณ 0.1135 กรัม และไดโซเดียม ไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4 ; Sigma-Aldrich) ปริมาณ 35.5544 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 100 ซีซี จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตรในขวดวัด ปริมาตร และ 2. สารละลายเฟอริ-เฟอร์โร ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ (Ferri-ferro PSB) pH 9 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เตรียมจากการเติมโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl; Sigma-Aldrich) ปริมาณ 3.7279 กรัม โพแทสเซียมเฟอริไซยาไนด์(III) ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$; MERCK) ปริมาณ 1.6411 กรัม และโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(II) ไตรไฮเดรต ($\text{K}_4(\text{Fe}(\text{CN})_6) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; MERCK) ปริมาณ 1.864 กรัม ลงใน สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PSB) และปั่นกวนด้วย เครื่องกวนแบบแม่เหล็กจนได้สารละลายสีเหลืองใส [16]

2.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีน ออกไซด์เซนเซอร์

นำกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์ทั้ง 4 ความเข้มข้น ตรวจสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้า โดยให้ปลายกราฟีน ออกไซด์เซนเซอร์ด้านหนึ่งจุ่มในสารละลายเฟอริ-เฟอร์โร ฟอสเฟต (Ferri-ferro PSB) อีกด้านหนึ่งต่อกับขั้ววัด กระแสไฟฟ้าเพื่อวัดการตอบสนองกระแสไฟฟ้าโดยใช้ เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry; CV) พารามิเตอร์เครื่องวิเคราะห์ทางไฟฟ้า คืออัตราการ แสแกน 0.025 โวลต์ต่อวินาที เมื่อตั้งทิศทางการแสกน ระหว่าง -0.5 ถึง 0.7 โวลต์ ที่ 25°C

2.5 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยกราฟีน ออกไซด์เซนเซอร์

2.5.1 การเตรียมสารละลายเกลืออิมมัลชันมาตรฐาน

เตรียมเส้นโค้งการสอบเทียบ (Calibration curve) ของสารละลายเกลืออิมมัลชันที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์

(RH) ร้อยละ 11-97 เป็นตัวอ้างอิงสำหรับการวัดผล ตอบสนองทางไฟฟ้าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และความจุไฟฟ้า [16] โดย เตรียมจากการละลายสารประกอบเกลือในน้ำปราศจาก ไอออน จนเกลือไม่สามารถละลายได้อีก จากนั้นปิดฝา และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ สารละลายเกลือตกผลึกเป็นสารละลายเกลืออิมมัลชัน พร้อมใช้งาน

ตารางที่ 1 การเตรียมสารละลายเกลืออิมมัลชัน

สารละลาย	ปริมาณสาร (g) : ปริมาตรน้ำกลั่น (ml)	%RH
ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl; MERCK)	88.7 : 100	11
โพแทสเซียมอะซิเตด (CH_3COOK ; Sigma-Aldrich)	80.2 : 25	23
แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2 ; Sigma-Aldrich)	235 : 100	33
โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3 ; MERCK)	56 : 50	43
โซเดียมโบรไมด์ (NaBr; MERCK)	35.10 : 100	59
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl; MERCK)	37.85 : 50	75
โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl; Sigma-Aldrich)	35.90 : 100	84
โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3 ; Sigma-Aldrich)	33.97 : 100	93
โพแทสเซียม ซัลเฟต (K_2SO_4 ; Sigma-Aldrich)	2.00 : 100	97

2.5.2 การทดสอบการนำความชื้น

การวัดค่าการนำไฟฟ้าจากความชื้นของกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าความจุไฟฟ้า และความชื้นสัมพัทธ์จากสารเคมีเกลืออิ่มตัวด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR meter) รุ่น LCR-9063, Lutron, Japan ที่ทำงานด้วยหลักการวัดอิมพีแดนซ์ หรือการต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรซึ่งเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ โดยการวัดแรงดัน (V) ตกคร่อม, กระแส (I) ที่ไหลผ่าน และมุมเฟสที่แตกต่างกันระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า เลือกใช้ความถี่ทดสอบที่ 100 เฮิร์ตเป็นตัวแทนในการหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าทำโดยเริ่มจากจุ่มกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์ในสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ 11%RH จากนั้นใช้เครื่อง LCR และที่ขั้วอิเล็กโทรดเพื่ออ่านค่าความจุไฟฟ้า และเปลี่ยนสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่อมาจนครบ และนำค่าความจุไฟฟ้าไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ต่อไป

2.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์

กราฟีนออกไซด์เซนเซอร์ที่เตรียมขึ้นมานี้จะถูกนำมาตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-IT300, JEOL, Japan ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่าง ลวดลายบนผิวตัวอย่าง และพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของกราฟีนออกไซด์ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีทางไฟฟ้า ตามสมการที่ (1)

$$S = \frac{A}{m} \quad (1)$$

โดยที่

S = พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางมิลลิเมตรต่อกรัม)

A = พื้นที่ผิวของกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์ (ตารางมิลลิเมตร)

m = น้ำหนักของอนุภาคกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์ (กรัม)

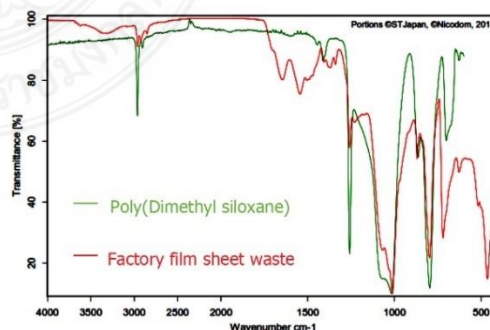
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

จากการตรวจสอบลักษณะเบื้องต้นของแผ่นฟิล์มที่นำมาใช้เป็นวัตถุในการวิจัยนี้ พบว่าฟิล์มนี้เป็นแผ่นเรียบ มีความคงตัว มีค่าความหนาโดยเฉลี่ย 0.105 มิลลิเมตร และมีสีขาวขุ่นโดยมีค่า L^* 93.68, a^* 3.94, และ b^* -11.21 ตามลำดับ จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าฟิล์มนี้สามารถเขียน หรือพิมพ์ลายลงบนผิวหน้าของแผ่นฟิล์มได้

3.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของแผ่นฟิล์ม

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิคอินฟราเรดของแสงแบบสะท้อน (ATR-FTIR) พบว่าแผ่นฟิล์มนี้เป็นซิลิโคนที่มีค่าการสะท้อนแสงในตำแหน่งขององค์ประกอบของเคมีใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ชนิดพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) ดังแสดงในรูปที่ 2

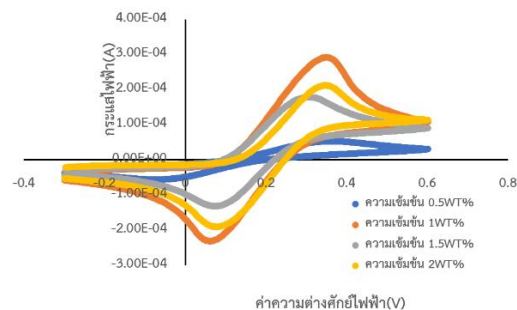


รูปที่ 2 การเทียบหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างพลาสติกกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน

พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethyl siloxane; PDMS) เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มออร์กาโนซิลิกอน (Organosilicon) คุณสมบัติโดยทั่วไปจะมีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ไม่ติดไฟง่าย มีความคงตัวต่อความร้อน ร้อยละการหดตัวหลังจากได้รับความร้อน 1.1 มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity; k) 0.2 วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน มีความยืดตัวสูง (Elongation) ประมาณมากถึงร้อยละ 160 มีความโปร่งแสง มีความคงทนต่อการกระแทกและเสียดสี ปรับแต่งพื้นผิวได้ [17-18] สอดคล้องกับผลการศึกษาทางลักษณะทางกายภาพที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ เมื่อศึกษาสมบัติด้านการใช้งานพบว่าฟิล์มนี้สามารถใช้เป็นวัสดุทริโบอิเล็กทริก หรือวัสดุที่มีปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าสถิตย์ เกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจากแรงกระตุ้นเชิงกลของความต่างศักย์ และความชื้นของวัสดุ [19] พอลิไดเมทิลซิลอกเซนนี้เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีความสำคัญในการนำมาใช้ประโยชน์ทางไฟฟ้า โดยเฉพาะความสามารถของการให้สมบัติความเป็นขั้วลบทางทริโบอิเล็กทริก(Negative triboelectric material) [18] ที่นำมาเพิ่มผลลัพธ์ในการนำไฟฟ้า จึงสามารถนำมาพัฒนาเป็นอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์วัดความชื้นได้

3.3 สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์

การพิสูจน์เอกลักษณ์การนำส่งอิเล็กตรอนของกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณทางด้านเคมี เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีดอกซ์ที่เกี่ยวข้องกับศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง และเกิดปฏิกิริยาของกราฟีนออกไซด์บนผิวของเซนเซอร์ในสารละลายเฟอร์โรเฟอโร ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ จะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer reaction) บนผิวของขั้วไฟฟ้า ส่งสัญญาณออกมาในรูปแบบไซคลิกโวลแทมเมตรีดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์

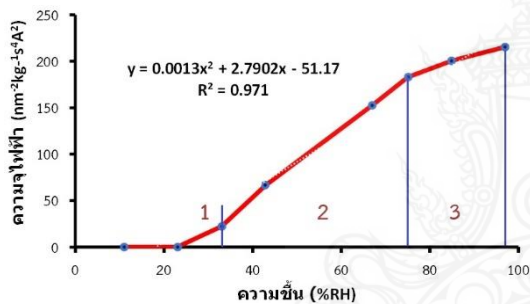
จากรูปที่ 3 เห็นได้ว่ากราฟีนออกไซด์เป็นสารตัวกลางสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีสังเกตจากลักษณะของรูปทรงของกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ชัดเจน เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนดีมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือสภาพคล่องมีมากถึง 200,000 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที มีความยืดหยุ่นสูง [7] สามารถเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าได้ทำให้เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับเซนเซอร์

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า พบว่ากราฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 0.5 %w/v ให้ค่าต้านทานสูงสุด พิจารณาจากลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นจะมีรูปทรงที่แคบเมื่อเทียบกับกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นอื่น และเมื่อพิจารณาผลของค่าการนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ จะเห็นค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง -0.0000231 - 0.000293 แอมแปร์ โดยกราฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 1%w/v ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงกว่าที่ความเข้มข้น 0.5%w/v แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกราฟีนออกไซด์เป็น 1.5%w/v และ 2.0%w/v กลับพบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำลง เนื่องจากการใช้กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ชั้นความหนาของโมเลกุลกราฟีนออกไซด์ปกคลุมผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จนเกิดการขัดขวางการนำส่งอิเล็กตรอนที่ผิวหน้า

ไฟฟ้า [8] ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้กราฟีนออกไซด์ ความเข้มข้น 1.0%w/v ที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดเป็นตัวแทนในการทดลองในการหาความสัมพันธ์ของค่าความชื้นต่อไป

3.4 ความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์บนกราฟีนเซโนเซอร์โดยวัดความจุไฟฟ้าบนกราฟีนเซโนเซอร์เทียบกับค่าความชื้นจากเส้นโค้งการสอบเทียบของสารละลายเกลืออิ่มตัว ได้ความสัมพันธ์อยู่ในรูปสมการพหุนามกำลังสอง (Polynomial 2nd power) ดังแสดงในรูปที่ 4



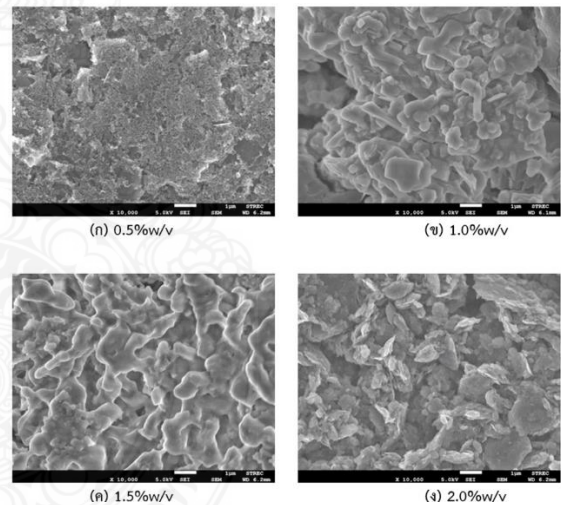
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์และค่าความจุไฟฟ้า

จากรูปที่ 4 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงขึ้น ความสัมพันธ์เป็นไปสมการ $y = 0.0013x^2 + 2.7902x - 51.17$ ที่ค่า $R^2 = 0.971$ ปรากฏการณ์ที่สำคัญจะแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะมีไฟฟ้าสถิตย์ค่อนข้างสูง การแตกตัวของประจุไฟฟ้าในช่วงนี้มีค่าต่ำ ส่งผลให้กราฟีนออกไซด์เซโนเซอร์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและไม่สามารถแยกช่วงความชื้นได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็นระยะที่ 2 กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นผิวของวัสดุ และเร่งการแตกตัวของประจุไฟฟ้า ส่งผลให้กราฟีนออกไซด์เซโนเซอร์

แสดงสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี และสามารถจำแนกความชื้นสัมพัทธ์ออกมาได้อย่างชัดเจน และความสามารถในการนำไฟฟ้าจะเริ่มคงที่ระยะที่ 3 เมื่อมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นยางดิบ [12] และยางพารา [13]

3.5 สันฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์เซโนเซอร์

กราฟีนออกไซด์เซโนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นแสดงสันฐานวิทยาจากการสร้างภาพพื้นผิวจากปฏิกิริยาของลำแสงอิเล็กตรอน กับอะตอมของกราฟีนออกไซด์บนแผ่นเซโนเซอร์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 2.0, และ 4.0%w/v ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5



ก) 0.5%w/v ข) 1.0%w/v ค) 1.5%w/v ง) 2.0%w/v

รูปที่ 5 สันฐานวิทยาของกราฟีนเซโนเซอร์

จากรูปที่ 5 พบว่าผิวของกราฟีนออกไซด์เซโนเซอร์ประกอบไปด้วยอนุภาคกราฟีนที่มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมซ้อนกันติดกันเป็นชั้นกระจายตัวบนเซโนเซอร์จากแผ่นพลาสติก และปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์สูงขึ้น และความขรุขระบนชั้นผิวอนุภาคจะเพิ่ม

มากขึ้นตามลำดับ [8] จากลักษณะดังกล่าวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลให้เกิดการขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านรอยต่อระหว่างแผ่นกราฟีนออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์เซนเซอร์

จากผลการศึกษาเมื่อใช้ความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์ 1.0% w/v เป็นตัวแทนในการคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของกราฟีนที่ทำปฏิกิริยาเมื่อน้ำหนักของอนุภาคกราฟีนมีค่าเท่ากับ 0.0804 กรัม และพื้นที่ผิวของกราฟีนเซนเซอร์มีขนาด 6 ตารางมิลลิเมตร จะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของกราฟีนที่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 74.6269 ตารางมิลลิเมตรต่อกรัม

4. สรุป

งานวิจัยนี้สามารถนำขยะฟิล์มจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอประเภทพอลิไธไมด์ซิลลอกเซนมาอัพไซเคิลเป็นอิเล็กโตรเคมีคัลเซนเซอร์ โดยใช้หลักการให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เมื่อความต่างศักย์เกิดการเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของกราฟีนออกไซด์บนผิวของเซนเซอร์ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วอิเล็กโตรดกราฟีนออกไซด์เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นกราฟีนออกไซด์ 1.0% w/v เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสม ทำให้อิเล็กโตรดที่ได้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเซนเซอร์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์ ในช่วงความถี่ทดสอบที่ 100 เฮิร์ต โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความชื้นสัมพัทธ์เป็นไปตามสมการ $y = 0.0013x^2 + 2.7902x - 51.17$ ที่ค่า $R^2 = 0.971$ เป็นอิเล็กโตรเคมีคัลเซนเซอร์ที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบแกดเจ็ต (Gadget) สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความชื้นที่ต้องการความยืดหยุ่น หรือการโค้งตัว สำหรับการใช้

งานที่หลากหลาย เช่น ด้านกีฬา เซนเซอร์ชีวภาพ และเครื่องมือตรวจสุขภาพแบบพกพา[6] เพื่อช่วยในการตรวจวัดสุขภาพของบุคคล และข้อมูลทางชีวภาพต่างๆ ซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสุขภาพ (Electronic healthcare) ที่สามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว และมีความต้องการเป็นอย่างมากตอบสนองกับการเปลี่ยนผ่านประเทศไทยเข้าสู่สังคมแห่งเทคโนโลยี ด้วยวิถีชีวิตที่เรียกว่าการใช้ชีวิตแบบอัจฉริยะ (Smart life) เพื่อส่งเสริมคุณภาพชีวิตที่ดีของประชาชนต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และ ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Plastics Institute of Thailand, "Plastic wastes," [Online]. Available: https://www.thaiplastics.org/document_page.php?id=1210. [Accessed: May 10, 2023].
- [2] I. Appamato, V. Harnchana, and V. Amornkitbamrung, "Development of an electrochemical sensor for the determination of carbaryl," *Burapha Science Journal*, vol. 25, no. 3, pp. 1229–1246, Sep.–Dec. 2020.
- [3] A. Beniwal, P. Ganguly, A. K. Aliyana, G. Khandelwal, and R. Dahiya, "Screen-printed graphene-carbon ink based disposable humidity sensor with wireless communication," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 374, 132731, Jan. 2023.

- [4] L. Zhou, M. Wang, Z. Liu, J. Guan, T. Li, and D. Zhang, "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*, vol. 344, 130219, Oct. 2021.
- [5] C. H. Kwak C. Lim, S. Kim, and Y. S. Lee, "Surface modification of carbon materials and its application as adsorbents," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol.116, pp.21-31, Dec. 2020.
- [6] H. Luo, and B. Gao, "Development of smart wearable sensors for life Healthcare," *Engineered Regeneration*, vol.2, pp.163-170, Oct.2021.
- [7] M. Srikaew, and S. Saengsuwan, "Graphene (The miracle material): Strategies for Synthesis, Properties, Development, Characterizations and Applications," *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, vol.22, no.2, pp.39-49, May-Aug.2020.
- [8] C. Damphathik, K. Kalcher, G. Raberb, A. Ortner, and A. Samphao, "Development of an Electrochemical Sensor Based on Hemin Modified Screen-Printed Carbon Electrode for the Determination of Artemisinin," *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 21, no.2, pp.171-180, May-Aug. 2019.
- [9] Z. Wan, N. T. Nguyen, Y. Gao, and Q. Li, "Laser induced graphene for biosensors," *Sustainable Materials and Technologies*, vol.25, Sep. 2020.
- [10] H.M. Z. Yousaf, S. W. Kim, G. Hassan, K. Karimov, K. H. Choi, and M. Sajid, "Highly sensitive wide range linear integrated temperature compensated humidity sensors fabricated using Electrohydrodynamic printing and electrospray deposition," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol.308, Apr. 2020.
- [11] E. R. Radu, D. M. Panaitescu, L. Andrei, F. Ciuprina, C. A. Nicolae, A. R. Gabor, and R. Truscă, "Properties of Polysiloxane/Nanosilica Nanodielectrics for Wearable Electronic Devices," *Journal of Nanomaterials*, vol.12, Dec. 2021.
- [12] N. Thongprapai, C. Jaktharanon, P. Thongsawasdiwong, and C. Chawpradit, "A study on the correlation between the moisture and electric properties of rubber sheet," in *Proceedings of the 28th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, Khon Kaen, Thailand, Oct. 2014, pp. 409–415.
- [13] K. Chetpattananondh and P. Chetpattananondh, "Development of Moisture Content Measurement for rubber wood using Interdigital Electrode" *Full research paper*, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. 2017.
- [14] R. Boonmee, A. Chitbuengphrao, T. Tangkuaram, Y. Rimcholakarn, P. Lertsuwanpisan, and A. Preechaworapun, "Quercetin Determination in Juice by Low

- Cost Electrode of Pencil Graphite Modified with Graphene Oxide,” *The Science Journal of Phetchaburi Rajabhat University*, vol.14, no.2, pp. 45-54, Jul.-Dec. 2018.
- [15] A. Rivadeneyra, J. F. Salmerón M. Agudo, J. A. L. Villanueva, L. F. C. Vallvey, and A. J. Palma “Design and characterization of a low thermal drift capacitive humidity sensor by inkjet-printing,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol.195., pp.123-131, May 2014.
- [16] C. Zhu, L. Q. Tao, Y. Wang, K. Zheng, J. Yu, L. Xiandong, and Y. Huang “Graphene oxide humidity sensor with laser-induced graphene porous electrodes,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 325, Aug. 2020.
- [17] K. Zalewski, Z. Chyłek, and A. Waldemar, “A Review of Polysiloxanes in Terms of Their Application in Explosives,” *Polymer Journal*, vol 13, no.7, pp. 1080, Mar. 2021.
- [18] P.Luechar, and V.Harnchana, “Power Output Enhancement of Triboelectric Nanogenerator with Surface Modified polydimethylsiloxane,” in *Proceeding The 22nd National Graduate Research Conference*, Khon Kaen University, Thailand, 2021, pp. 1-8.
- [19] I. Appamato, V. Harnchana, and V. Amornkitbamrung, “Fabrication of triboelectric nanogenerator from natural rubber film,” in *Proceedings of The 22nd National Graduate Research Conference (Online Conference)*, Khon Kaen, Thailand, 2021, pp. 720–726.