

การพัฒนาแบตเตอรี่ปฐมภูมิสังกะสีแมงกานีสไดออกไซด์ด้วยวัสดุเซลลูโลส Development of Primary Zn/MnO₂ Battery with Cellulose-based Material

ภาณุวัฒน์ เอกธรรมสุทธิ์^{1*} กัญญากัญ สุริโย¹ และ ชนัญชิตา เชื้อชาติ¹

Panuwat Ekdhamasuit¹ Kanyapak Suriyo¹ and Chananchida Chueachat¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

¹Program Study of Energy Technology and Management, Faculty of Science, Energy and Environment,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong Campus

วันที่ส่งบทความ : 28 มิถุนายน 2564 วันที่แก้ไขบทความ : 26 เมษายน 2565 วันที่ตอบรับบทความ : 15 พฤศจิกายน 2565

Received: 28 June 2021, Revised: 26 April 2022, Accepted: 15 November 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพัฒนาเซลล์แบตเตอรี่ชนิดสังกะสีแมงกานีสไดออกไซด์ (Zn/MnO₂) โดยมี ส่วนประกอบของวัสดุเซลลูโลส แผ่นกั้นเซลล์แบตเตอรี่เลือกใช้กระดาษกรองวอทแมนเกรด 1 (Whatman 1) สำหรับพื้นที่ขั้วไฟฟ้าและกั้นน้ำภายในเซลล์จะใช้แวกซ์เป็นตัวกำหนดขอบเขต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส (Sodium Carboxymethyl Cellulose: CMC) ถูกนำมาผสมในขั้วอิเล็กโทรดเพื่อใช้เป็น ตัวประสานที่เป็นตัวปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์ และทำการศึกษาผลของความหนาของแผ่นกั้นเซลล์ด้วย โดยมีเทคนิคการวินิจฉัยเซลล์แบตเตอรี่คือ การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ (Polarization Test) อิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) และการดิสชาร์จกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา (Current Discharging with Time Test) ผลการทดสอบพบว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่มีความหนาแผ่นกั้นเซลล์ ขนาดบาง และมีการผสม CMC ในขั้วอิเล็กโทรดจะให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงที่สุด โดยมีค่าความต่างศักย์ วงจรเปิดเท่ากับ 1.13 V และมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 0.275 mA/cm² และ 0.052 mW/cm² ตามลำดับ นอกจากนี้ การใช้แผ่นกั้นเซลล์ที่หนาน้อยกว่า จะให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากกว่า เนื่องจากการใช้แผ่นกั้นที่มีความหนาน้อยส่งผลให้ถ่ายเท OH⁻ ได้สะดวก และนำไปสู่การลดลงของการสูญเสียเนื่องจากการทำปฏิกิริยา งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึง ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วัสดุเซลลูโลสเพื่อเป็นส่วนประกอบเซลล์แบตเตอรี่ปฐมภูมิ สำหรับเป็น แหล่งพลังงานทางเลือกที่มีราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาด พกพา

คำสำคัญ : แบตเตอรี่กระดาษ เซลลูโลส แผ่นกั้น ประสิทธิภาพ อิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้า

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: panuwat.e@sciee.kmutnb.ac.th

Abstract

In this paper, we present the development of primary cellulose-based zinc/manganese dioxide (Zn/MnO₂) battery. The battery was fabricated using Whatman 1 paper as a cell separator. The hydrophobic and hydrophilic barriers of the electrodes were created by using painted wax. Sodium carboxymethyl cellulose (CMC) was added into electrodes as a binder to improve their performance and the separators with different thicknesses were investigated. Characterization techniques including battery cell performance test (polarization curve), electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and current discharging with time measurement were demonstrated. It was found that the battery cell adding CMC into electrodes delivered highest cell performance. It displayed an OCV of 1.13 V and a maximum current density and maximum power density of 0.275 mA/cm² and 0.052 mW/cm², respectively. Additionally, the battery cell fabricated with a thin separator showed better performance due to the enhancement of OH⁻ transportation leading to lower activation loss. These demonstrations reveal the possibility of applying cellulose into primary battery cell as an alternative low-cost and environmentally friendly power source for portable electronic devices.

Keywords: Paper battery, Cellulose, Separator, Performance, Electrochemical impedance spectroscopy

1. บทนำ

แบตเตอรี่คืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ทางเคมีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ในปัจจุบันแบตเตอรี่ปฐมภูมิเป็นชนิดของแบตเตอรี่ที่นิยมใช้สำหรับเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ได้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง มีความนิยมใช้สำหรับอุปกรณ์พกพาขนาดเล็กที่มีกำลังไฟฟ้าในช่วงระดับมิลลิวัตต์หรือต่ำกว่าถึงไมโครวัตต์เช่น เซนเซอร์ชีวภาพ ชุดวินิจฉัยทางการแพทย์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ และอื่น ๆ ซึ่งตามสถิติการใช้งานในตลาดภาพรวมโลก การใช้งานแบตเตอรี่ปฐมภูมิมีอัตราการเติบโตระหว่างช่วงปี ค.ศ. 2016 ถึง 2020 เท่ากับ 4.06 % [1] อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ดังกล่าวแม้จะมีความจำเป็น และช่วยเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งาน แต่เมื่อใช้เสร็จแล้วก็จะสร้างขยะที่ย่อยสลายยากหรือขยะพิษในปริมาณมาก

ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์แบตเตอรี่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดฝังแอโนด ขั้วอิเล็กโทรดฝังแคโทด แผ่นนำกระแส สารอิเล็กโทรไลต์ และแผ่นกั้นเซลล์ ขณะที่เซลล์กำลังทำงานจ่ายกระแสไฟฟ้า ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจ่ายอิเล็กตรอนไปยังวงจรภายนอก ในขณะที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันรับอิเล็กตรอนจากวงจรภายนอก โดยมีแผ่นนำกระแสทำหน้าที่ช่วยนำส่งอิเล็กตรอนดังกล่าว อิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของไอออนที่ส่งถ่ายระหว่างแอโนดและแคโทด และแผ่นกั้นเซลล์มีหน้าที่ในการกั้นไม่ให้ปฏิกิริยาทั้งสองฝั่งผสมกัน

เมื่อเร็ว ๆ นี้ นักวิจัยเริ่มมีแนวคิดในการนำกระดาษมาเป็นส่วนประกอบสำหรับการประกอบแบตเตอรี่เพื่อใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น [2] เนื่องจากข้อดีของกระดาษมีดังนี้คือ กระดาษมีราคาถูกและหาง่าย มีความบาง น้ำหนักเบาและยืดหยุ่นได้ จัดการง่ายเมื่อหมดอายุการใช้งานเนื่องจากย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติหรือสามารถใช้วิธีการกำจัดที่ราคาถูกเช่นการเผาได้ และมีพื้นที่ผิวและมีความพรุนสูงจึงสามารถใช้กักเก็บสารหรือปรับสภาพด้วยสารเคมีหรือวัสดุนาโนได้ง่าย โดยสำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการทดลองใช้กระดาษในแบตเตอรี่หลายชนิดเช่น เป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่สังกะสี-อากาศ [3] เป็นแผ่นกั้นในลิเทียมแบตเตอรี่ [4] และเป็นส่วนประกอบในอิเล็กโทรเคมีคอลแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ [5]-[6]

นอกจากการใช้กระดาษเป็นส่วนประกอบของแบตเตอรี่แล้ว อนุพันธ์ของเซลลูโลสก็มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของแบตเตอรี่ ยกตัวอย่างเช่น โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethyl Cellulose: CMC) CMC เป็นโพลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุห่ออาหารหรือเจลแต่งแผลทางการแพทย์ [7]-[8] โดยมีงานวิจัยที่นำ CMC มาเป็นส่วนประกอบของแบตเตอรี่พบว่า CMC ถูกนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ได้ โดยนำแผ่นโพลิเมอร์ของ CMC ที่ผสมกับ NH_4Br ในอัตราส่วนต่างๆ ขึ้นรูปเป็นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสำหรับเซลล์แบตเตอรี่ทุติยภูมิแบบกรด [9]-[10] พบว่าเมมเบรนที่ได้มีความเหนียวมากพอที่จะสามารถยืดออกได้นอกจากนี้การนำไอออนยังเพิ่มขึ้นได้อีกเมื่อใช้สารเติมแต่งอื่นเช่น โพลีเอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอลหรือเอทิลีนไกลคอล ทำให้ได้โพลิเมอร์ที่มีความพรุนตัวเหมาะสม [10] นอกจากสามารถใช้งานเป็นโครงสร้างหลักของเมมเบรนแล้ว CMC ยังสามารถใช้เพื่อเป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อเพิ่มการนำไอออนได้อีกด้วย โดย CMC ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับโลหะสังกะสีเพื่อเป็นขั้วแอโนดทั้งในแบตเตอรี่ [11] และเซลล์เชื้อเพลิง [12] ด้วยความน่าสนใจข้างต้น ทำให้กระดาษเซลลูโลสและสารอนุพันธ์เซลลูโลสเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการประกอบเซลล์แบตเตอรี่ต่อไป

เซลล์แบตเตอรี่ชนิด Zn/MnO_2 เป็นแบตเตอรี่ชนิดหนึ่งที่มีนิยมนำกันอย่างกว้างขวางสำหรับใช้เป็นแบตเตอรี่ปฐมภูมิขนาดพกพา เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง ให้กำลังไฟฟ้าสูง และมีความทนทานสูง [13] ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือที่ขั้วแอโนดคือออกซิเดชันของสังกะสี (Zn) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ได้เป็นสารละลายซิงเคตไอออน ($\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$) หรือซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($\text{Zn}(\text{OH})_2$) และอิเล็กตรอน ในขณะที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) กับน้ำ (H_2O) และอิเล็กตรอน ได้เป็นแมงกานีส (II, III) ออกไซด์ (Mn_3O_4) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) โดยไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) จะเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์จากแคโทดไปยังแอโนด งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของการผสม CMC ในชั้นขั้วอิเล็กโทรด และผลของความหนาแน่นแผ่นกั้นเซลล์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ Zn/MnO_2 โดยวินิจฉัยเซลล์ด้วยการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า ประกอบด้วยการทดสอบกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) การทดสอบกราฟอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) และการทดสอบกราฟการดีชาร์จไฟฟ้าเทียบกับเวลา (Current Discharging with Time Test)

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมเซลล์และสารเคมี

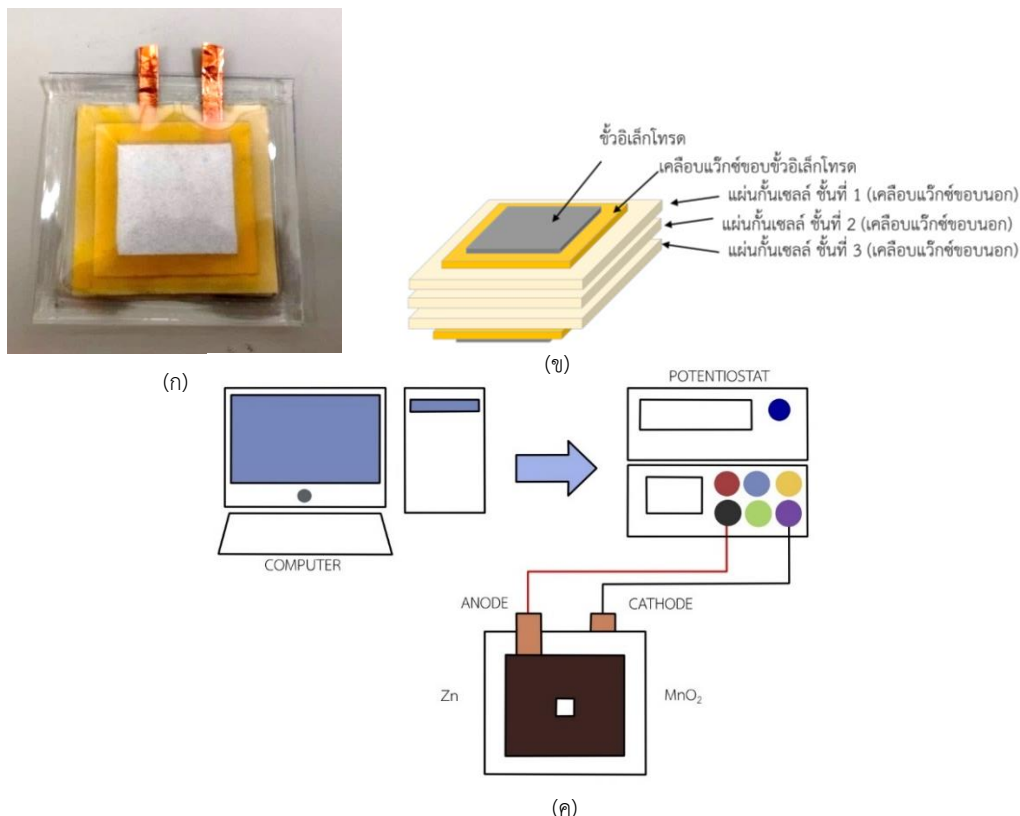
ขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์แบตเตอรี่ ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman® Filter Paper Grade 1) ซึ่งทำจากวัสดุเซลลูโลส มีความหนา 180 μm มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 11 μm มีน้ำหนักต่อพื้นที่ (Basis Weight) เท่ากับ 87 g/m^2 นำมาตัดให้มีขนาดเท่ากับ 4 x 4 เซนติเมตร แล้วนำไปตีกรอบให้มีขนาดพื้นที่ภายในสำหรับการเกิดปฏิกิริยาขนาด 3 x 3 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำกรอบนอกของกระดาษไปเคลือบแว็กซ์ เพื่อจำกัดขอบเขตของกระดาษที่ต้องการ

หมึกในการขึ้นรูปขั้วอิเล็กโทรดเตรียมได้โดยเตรียมผงสังกะสี (Zn, ZINC POWDER 96%, KemAus™) สำหรับฝั่งแอโนด และผงแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2 , Manganese Dioxide 80%, Loba Chemie™) สำหรับฝั่งแคโทด ทั้งสองฝั่งใช้ปริมาณผงของสารเท่ากับ 5 กรัม ละลายลงในเอทานอล ปริมาณ 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยอ่างผสมด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath Cleaner) ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 15 นาที จนได้หมึกที่มีความหนืดเหมาะสม แล้วนำไปไหลลงบนพื้นที่ที่กำหนดบนกระดาษกรองด้วยวิธีการทาด้วยฟู่กัน จนได้ปริมาณ 0.1 กรัม หลังจากนั้นนำขั้วอิเล็กโทรดที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 45 นาที เพื่อไล่ระเหยความชื้นและสารชนิดอื่นให้ออกจนหมด

การเตรียมสารให้ความคงตัวหรือตัวประสานทำได้โดยการชั่งสาร CMC ปริมาณ 0.025 กรัม ผสมลงในน้ำ DI จนได้สารละลายที่มีความหนืดเหมาะสม แล้วนำไปผสมกับหมึกขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองฝั่ง แผ่นกั้นของเซลล์แบตเตอรี่ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาดเท่ากับ 5 x 5 เซนติเมตร แล้วนำกระดาษไปตีกรอบเว้นส่วนขั้วอิเล็กโทรดภายในขนาด 4 x 4 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำกรอบนอกของกระดาษไปเคลือบแว็กซ์เพื่อจำกัดขอบเขตของกระดาษที่ต้องการ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่กระดาษคือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 2 M

2.2 การประกอบเซลล์

นำขั้วแอโนดและขั้วแคโทดที่เตรียมได้ข้างต้น ประกอบกับแผ่นกั้นเซลล์ หลังจากนั้นประกอบเซลล์ด้วยแผ่นพลาสติกเคลือบขนาด 6 x 6 เซนติเมตร ที่ถูกเจาะรูฝั่งแอโนดเพื่อเป็นช่องสำหรับหยดสารอิเล็กโทรไลต์ โดยในการประกอบจะใช้เทปตัวนำกระแสเป็นเทปทองแดงทั้ง 2 ฝั่ง หลังจากนั้นเซลล์เดี่ยวของแบตเตอรี่ถูกรัดขอบด้วยเครื่องรัดพลาสติก (Plastic Sealer) จนได้เป็นแบตเตอรี่กระดาษที่ถูกปิดขอบทั้งหมดดังรูปที่ 1 (ก) และสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการใช้แผ่นกั้นเซลล์ที่มีความหนาแตกต่างกัน จะทำได้โดยการเพิ่มชั้นจำนวนแผ่นกระดาษที่ใช้เป็นแผ่นกั้นซ้อนกันให้มีความหนาเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 1 (ข)



รูปที่ 1. (ก) เซลล์แบตเตอรี่กระดาษ (ข) ลักษณะการประกอบเซลล์เพิ่มจำนวนชั้นแผ่นกั้น และ (ค) ลักษณะการต่อวงจรด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

2.3 การวินิจฉัยเซลล์

นำเซลล์แบตเตอรี่ที่ประกอบเสร็จแล้ว มาวินิจฉัยด้วยวิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat (Metrohm Autolab, PGSTAT 302N) ซึ่งประกอบด้วยเทคนิคการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์โดยกราฟโพลาริเซชัน การทดสอบกราฟอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้า และการทดสอบกราฟการดิงกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา

การทดสอบกราฟโพลาริเซชัน ทดสอบโดยควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์ทดสอบในช่วงที่เซลล์ทำงาน แล้ววัดค่ากระแสที่ตอบสนองออกมาในแต่ละค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยสภาวะการทดสอบทดสอบเซลล์ที่อุณหภูมิ 25°C ช่วงแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 1.25 ถึง 0 V เป็นเวลา 3 นาที โดยกำหนดปริมาตรสารอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.3 มิลลิลิตร

การทดสอบกราฟการดิงความต่างศักย์เทียบกับเวลา เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไว้ที่ค่าหนึ่งตามที่กำหนดในระยะเวลาที่สนใจ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ตอบสนองมาจากเซลล์ตามเวลาที่กำหนดไว้ โดยสภาวะการทดสอบ ทดสอบเซลล์ที่อุณหภูมิ 25°C ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.4 V กำหนดปริมาตรสารอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.3 มิลลิลิตร ทำการทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที

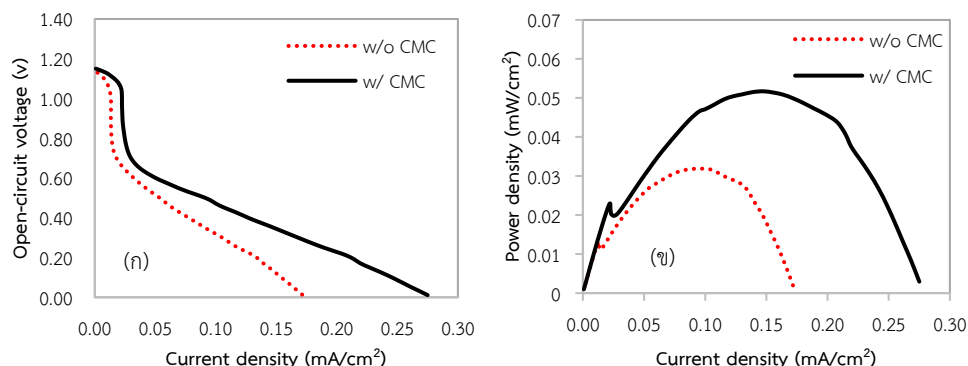
การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าเป็นการบ่อนความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้าในลักษณะรูปแบบสัญญาณกระแสสลับ โดยการเปลี่ยนความถี่จากค่าสูงสุดไปยังค่าต่ำสุด และแต่ละความถี่ที่บ่อนที่เปลี่ยนแปลงไปจะได้ค่าตอบสนองกลับมาในรูปแบบของค่าความต้านทานไฟฟ้าของวงจรกระแสสลับหรือที่เรียกว่าอิมพีแดนซ์ (Impedance, Z) โดยสภาวะการทดสอบเซลล์ ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ค่าความต่างศักย์กำหนดเท่ากับ 0.4 V ช่วงความถี่ควบคุมจาก 1,000,000 จนถึง 0.1 Hz แอมพลิจูด 0.04 V (กำหนดเป็น 10% ของค่าความต่างศักย์ที่กำหนด) กำหนดปริมาตรสารอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.3 มิลลิลิตร

ในทุก ๆ การวิเคราะห์เซลล์แบตเตอรี่ จะทำการต่อวงจรเพื่อควบคุมและวัดค่าในรูปแบบดังนี้ กำหนดให้ขั้วที่ทำงาน (Working Electrode: WE) ต่อเข้ากับขั้วแอโนดของเซลล์แบตเตอรี่ ส่วนขั้วตรงข้าม (Counter Electrode: CE) และขั้วอ้างอิง (Reference Electrode: RE) ต่อเข้ากับขั้วแคโทด จากนั้นทำการหยดสารอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่กำหนดเข้าสู่เซลล์แบตเตอรี่ รอเวลาประมาณ 3 นาที เพื่อให้เซลล์เข้าสู่สถานะคงตัว แล้วจึงทำการวิเคราะห์ตามวิธีการต่าง ๆ โดยแต่ละการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ซ้ำเพื่อยืนยันความคงที่ของข้อมูล กำหนดวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง ในทุกการทดสอบ ดังนั้นผลการทดลองที่ถูกเลือกมาใช้ทั้งหมดนั้น ถือว่าได้รับการยืนยันถึงความน่าเชื่อถือแล้วระดับหนึ่ง โดยมีแผนผังการต่อเซลล์และอุปกรณ์การทดสอบเซลล์ดังรูปที่ 1 (ค)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลของการผสมสารยึดเกาะในขั้วอิเล็กโทรด

การผสมสารยึดเกาะในขั้วอิเล็กโทรดมีความสำคัญในการขึ้นรูปและคงรูปของขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์แบตเตอรี่ นำไปสู่การทำงานของเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความคงทน ในงานวิจัยนี้สารยึดเกาะที่ใช้คือ CMC โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานของเซลล์ที่ผสมและไม่ผสม CMC การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่เพื่อเปรียบเทียบผลของการใส่และไม่ใส่สารคงตัว CMC ทำได้โดยวิเคราะห์กราฟโพลาริเซชัน ดังแสดงผลในรูปที่ 2 (ก) จากกราฟพบว่าทั้งสองเซลล์มีความต่างศักย์วงจรเปิดใกล้เคียงกันที่ 1.13 V แต่เมื่อถึงกระแสไฟฟ้าสูงสุดจะพบว่าทั้งสองเซลล์มีการทำงานที่แตกต่างกัน เซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC จะให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.275 mA/cm² ในขณะที่เซลล์ที่ไม่ผสม CMC ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.172 mA/cm² เซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC สามารถให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 59.88 % กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2 (ข) จากกราฟพบว่าเซลล์ที่ผสม CMC ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.052 mW/cm² ในขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.032 mW/cm² เซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นจากเมื่อไม่ผสมเท่ากับ 62.50 % ซึ่งมีนัยสำคัญในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

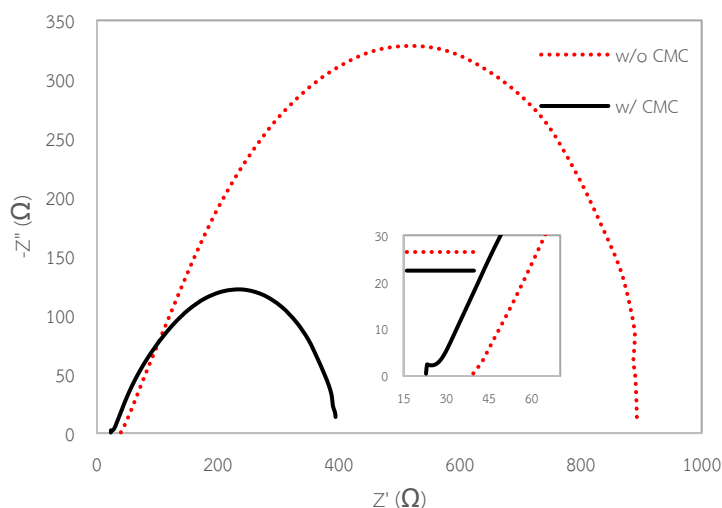


รูปที่ 2. กราฟเปรียบเทียบผลของการไม่ใส่และใส่ CMC ในขั้วอิเล็กโทรดเซลล์แบตเตอรี่ แสดงในรูปแบบ
(ก) กราฟโวลตาเรชัน และ (ข) กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์จำแนกชนิดของความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่สามารถทดสอบได้จากการทดลองอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมีและแสดงในรูปแบบของไนควิสต์พล็อต (Nyquist Plot) โดยกราฟไนควิสต์พล็อตของการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์การผสม CMC ในขั้วอิเล็กโทรดเซลล์แบตเตอรี่แสดงได้ดังรูปที่ 3 การอธิบายความหมายกราฟจะมีบริเวณการวิเคราะห์ที่สำคัญอยู่สองบริเวณนั้นคือ บริเวณจุดตัดแกน X เริ่มต้นที่ทางซ้ายมือ จะสามารถอธิบายความหมายของการสูญเสียเนื่องจากกลไกส่งถ่ายประจุไฟฟ้าหรือเรียกว่าการสูญเสียแบบโอห์มมิก (Ohmic Loss) และอีกบริเวณคือช่วงขนาดความกว้างของรูปครึ่งวงกลมที่อ่านค่าหักกลับที่แกน X จะแสดงถึงความสูญเสียเนื่องจากการกระตุ้นทางปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Activation Loss) ที่ขั้วอิเล็กโทรดรวมทั้งสองฝั่งปฏิกิริยา โดยจากกราฟเมื่อพิจารณาการสูญเสียโอห์มมิกพบว่า เซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC มีความสูญเสียเท่ากับ 39.44 โอห์ม ในขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC มีความสูญเสียเท่ากับ 22.84 โอห์ม นั่นคือเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC มีค่าความสูญเสียโอห์มมิกมากกว่าเซลล์ที่ผสม CMC คิดเป็นค่ามากถึง 72.68 % และเมื่อพิจารณาการสูญเสียเนื่องจากการกระตุ้นปฏิกิริยาพบว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC มีความสูญเสียเท่ากับ 853.67 โอห์ม ในขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC มีความสูญเสียเพียง 394.48 โอห์ม ซึ่งจะเห็นว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการกระตุ้นปฏิกิริยามากกว่าถึง 2 เท่า

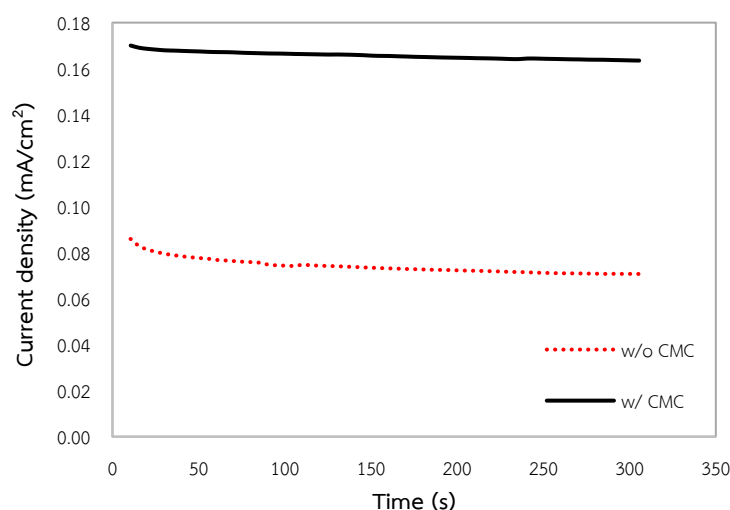
จากผลที่ได้ข้างต้น สามารถวิเคราะห์ผลได้ว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC มีความสูญเสียทางโอห์มมิกน้อยกว่าเซลล์ที่ไม่ผสม CMC เนื่องจากการผสม CMC ในขั้วอิเล็กโทรดมีข้อได้เปรียบทั้งในเรื่องการส่งถ่ายไอออนภายในเซลล์และการส่งถ่ายอิเล็กตรอนที่ภายนอกเซลล์ โดยการผสม CMC ทำให้สภาพขั้วอิเล็กโทรดยึดเกาะตัวกันได้ดีของผงสังกะสีหรือแมงกานีสออกไซด์กับ CMC และสามารถยึดเกาะหรือสัมผัสกับผิวของแผ่นกั้นเซลล์ได้ดี ส่งผลให้การไหลผ่านของ OH^- จากขั้วแคโทดผ่านแผ่นกั้นไปยังขั้วแอโนดมีประสิทธิภาพดี [11] และนอกจากนี้ สภาพขั้วที่ยึดเกาะดีนี้ทำให้ผิวสัมผัสกับแผ่นนำกระแสมีการแนบสัมผัสกันได้ดี จึงส่งผลต่อการนำอิเล็กตรอนส่งออกนอกเซลล์ที่ฝั่งแอโนด และการรับเข้าจากวงจรภายนอกที่ฝั่งแคโทดอีกด้วย อีกส่วนหนึ่งคือการวิเคราะห์ผลของความสูญเสียเนื่องจากการกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC มีความสูญเสียน้อยกว่าเซลล์ที่ไม่ผสม CMC เนื่องจากผลต่อเนื่องของการส่งถ่าย

ประจุทางไฟฟ้าที่ดีของเซลล์ที่ผสม CMC จึงทำให้การนำประจุไฟฟ้าไปใช้ในปฏิกิริยาทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผังแอโนด และปฏิกิริยารีดักชันฝั่งแคโทด เกิดความรวดเร็วมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3. กราฟ Nyquist Plot เปรียบเทียบผลของการไม่ใส่และใส่ CMC ในขั้วอิเล็กโทรดเซลล์แบตเตอรี่

ในการนำเซลล์ไปใช้ในสถานการณ์จริง มีความจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของเซลล์อย่างต่อเนื่อง ในช่วงเวลาหนึ่ง ดังนั้นจึงมีการทดสอบการดิงกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาในช่วงเวลาที่กำหนด โดยใช้เวลาในการทดสอบ 5 นาที ที่ความต่างศักย์คงที่เท่ากับ 0.4 V รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของการเปรียบเทียบเซลล์แบตเตอรี่ที่ผสมและไม่ผสม CMC ในขั้วอิเล็กโทรด จากกราฟพบว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ใส่ CMC ในขั้วอิเล็กโทรด ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ 0.170 mA/cm^2 จากนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเร็วในช่วงแรก และจากนั้นจึงลดลงอย่างช้า ๆ จนเมื่อสิ้นสุดเวลาการทดลอง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.164 mA/cm^2 ในขณะที่การทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC ในขั้วอิเล็กโทรดพบว่า มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ 0.086 mA/cm^2 หลังจากนั้นพฤติกรรมกราฟมีลักษณะเดียวกันคือลดลงเร็วในช่วงแรก และค่อย ๆ ลดลงในช่วงหลัง และได้ค่าความหนาแน่นกระแสสุดท้ายเท่ากับ 0.070 mA/cm^2



รูปที่ 4. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา
เปรียบเทียบผลของการไม่ใส่และใส่ CMC ในขั้วอิเล็กโทรดเซลล์แบตเตอรี่

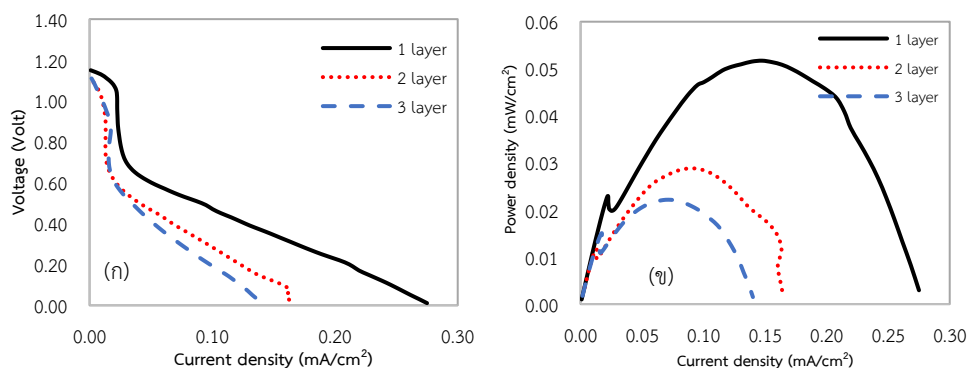
ผลการทดลองข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกของกราฟที่มีการลดลงของกระแสอย่างรวดเร็วมีสาเหตุเนื่องจากการสูญเสียในเรื่องการส่งถ่ายมวลสารที่ไม่เพียงพอ (Mass Transport Loss) และเมื่อเวลาผ่านไป เซลล์จะเข้าสู่สภาวะคงที่มากขึ้น (Steady state) โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของสองเซลล์ พบว่า เซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC มีการลดลงของค่ากระแสอย่างรวดเร็วในช่วงแรก โดยมีอัตราการลดลง (Decay Rate) ในช่วง 50 วินาทีแรกเท่ากับ $20.77 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2\cdot\text{s}$ ในขณะที่เซลล์ที่ผสม CMC มีอัตราการลดลงในช่วงดังกล่าวเพียง $6.44 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2\cdot\text{s}$ ซึ่งการผสม CMC ทำให้เซลล์มีอัตราการลดลงมีค่าลดลงถึง 68.97% จึงอาจกล่าวได้ว่าเซลล์ที่ผสม CMC มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการส่งถ่ายมวลสารน้อยกว่าเนื่องจากการผสม CMC อาจไปช่วยในการสร้างโครงข่ายภายในขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดการกระจายตัวและส่งถ่ายสารอิเล็กโทรไลต์ได้ดี

นอกจากนี้ ถ้าวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการลดลงของความหนาแน่นกระแสตลอดเวลา 5 นาที เซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC มีอัตราการลดลงโดยรวมเท่ากับ $5.16 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2\cdot\text{s}$ ในขณะที่เซลล์ที่ผสม CMC มีอัตราการลดลงรวมทั้งหมดเพียง $2.22 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2\cdot\text{s}$ หรือการผสม CMC ทำให้เซลล์มีอัตราการลดลงโดยรวมมีค่าลดลงถึง 57.01 % ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การมีอยู่ของ CMC สามารถสร้างสภาพขั้วอิเล็กโทรดให้สามารถกักเก็บความชื้นและสารละลายอิเล็กโทรไลต์บางส่วนไว้ในขั้วได้ จึงส่งผลให้สามารถรักษาระดับของการสร้างกระแสไฟฟ้าในช่วงการทดลองให้มีความสม่ำเสมอตลอดเวลาได้อย่างต่อเนื่อง และสุดท้ายคือการสังเกตสภาพโครงสร้างเซลล์ขณะทำงานจนเมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง เซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC ในขั้วอิเล็กโทรด สามารถรักษาการยึดเกาะตัวของขั้วอิเล็กโทรดได้ดี

3.2 ผลของความหนาแผ่นกั้นเซลล์

ความหนาของชั้นแผ่นกั้นเซลล์แบตเตอรี่ได้รับการคาดหวังในการเป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพเซลล์ ในการทดลองนี้จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบเซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC ในขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ความหนาที่แตกต่างกันของแผ่นกั้นเซลล์จำนวน 3 ค่า รูปที่ 5 (ก) แสดงกราฟโวลตาไรเซชันของเซลล์แบตเตอรี่ที่ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้แผ่นกั้นที่มีความหนาแตกต่างกันทั้งหมด 3 ค่าคือ ความหนาของชั้นแผ่นกั้น 1, 2 และ 3 ชั้น ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อถึงกระแสไฟฟ้าสูงสุดแล้ว เซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นกั้นหนา 1, 2 และ 3 ชั้นให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.275, 0.165 และ 0.140 mA/cm² ตามลำดับกล่าวคือ เมื่อใช้แผ่นกั้นหนา 2 และ 3 ชั้นจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลง 40.10 % และ 49.08 % จากการใช้แผ่นกั้น 1 ชั้น ตามลำดับ

กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ที่ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้แผ่นกั้นที่มีความหนาแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 5 (ข) จากกราฟพบว่าเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้น 1 ชั้นให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.052 mW/cm² เซลล์ที่ใช้แผ่นกั้น 2 ชั้น ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ารองลงมาเท่ากับ 0.029 mW/cm² เซลล์ที่ใช้แผ่นกั้น 3 ชั้น ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.022 mW/cm² จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้แผ่นกั้นจำนวน 2 ชั้น เซลล์จะให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลง 44.27 % จากเมื่อใช้แผ่นกั้น 1 และเมื่อใช้แผ่นกั้น 3 ชั้น เซลล์จะมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลง 57.12 % จาก 1 ชั้น ซึ่งทำให้ภาพรวมพบว่าการลดลงของประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นกั้นหรือความหนาแผ่นกั้น โดยจะวิเคราะห์สาเหตุของการลดประสิทธิภาพจากการทดสอบอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าต่อไป



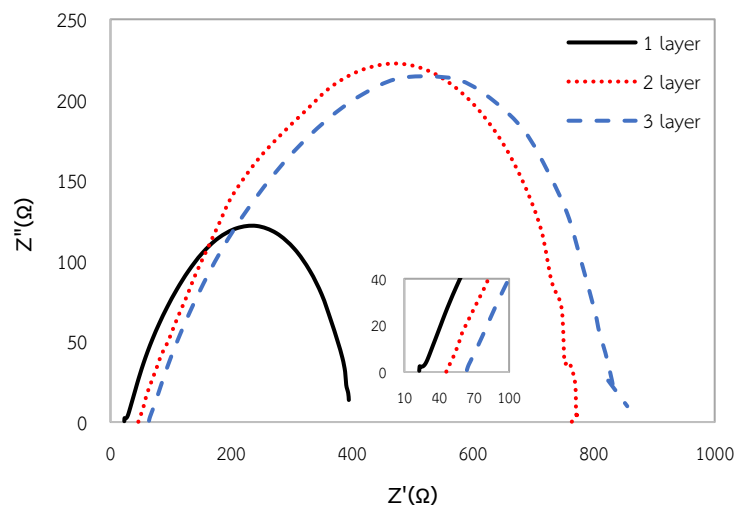
รูปที่ 5. กราฟเปรียบเทียบผลของความหนาชั้นแผ่นกั้นเซลล์แบตเตอรี่ แสดงในรูปแบบ

(ก) กราฟโวลตาไรเซชัน และ (ข) กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

จากการทดลองอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี กราฟโนควิสพล็อตของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความหนาชั้นแผ่นกั้นเซลล์แบตเตอรี่แสดงดังรูปที่ 6 จากกราฟจะเริ่มต้นจากการพิจารณาการสูญเสียโอห์มมิกพบว่า เซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นกั้น 1 ชั้นมีความสูญเสียทางโอห์มมิกน้อยที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 22.84 โอห์ม ในขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นกั้น 2 และ 3 ชั้นมีความสูญเสียทางโอห์มมิกเพิ่มขึ้นคือมีค่าเท่ากับ 46.10 และ 63.76 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นกั้นเซลล์เพิ่มขึ้นเป็น

2 และ 3 ชั้นทำให้มีความต้านทานโอห์มิกเพิ่มขึ้นจากการใช้แผ่นกั้น 1 ชั้นเท่ากับ 101.84 % และ 179.16 % ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการสูญเสียเนื่องจากการกระตุ้นปฏิกิริยาพบว่า เซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นกั้น 1 ชั้นมีความสูญเสียของการกระตุ้นปฏิกิริยาน้อยที่สุดเท่ากับ 394.48 โอห์ม ในขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นกั้น 2 และ 3 ชั้นมีความสูญเสียของการกระตุ้นปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นคือมีค่าเท่ากับ 763.43 และ 855.33 โอห์มตามลำดับ คิดเป็นเพิ่มขึ้น 93.53 % และ 116.82 % จากเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้น 1 ชั้น ตามลำดับ

จากผลที่ได้ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นกั้นเซลล์หนา 2 และ 3 ชั้นจะส่งผลไปเพิ่มความต้านทานการส่งถ่าย OH^- จากขั้วแคโทดผ่านแผ่นกั้นไปยังขั้วแอโนดอย่างมาก จึงเป็นการลดประสิทธิภาพของเซลล์ลง นอกจากนี้เมื่อใช้เซลล์ที่มีแผ่นกั้นหนาขึ้น ทำให้การส่งถ่ายไอออนผ่านแผ่นกั้นที่ลดลงนั้นส่งผลต่อเนื่องให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการกระตุ้นปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย การประกอบเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นเซลล์จำนวน 1 ชั้นจึงมีค่าการสูญเสียเนื่องจากโอห์มิกและการกระตุ้นปฏิกิริยาน้อยที่สุด ให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงที่สุด จึงเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดในขอบเขตงานวิจัยนี้

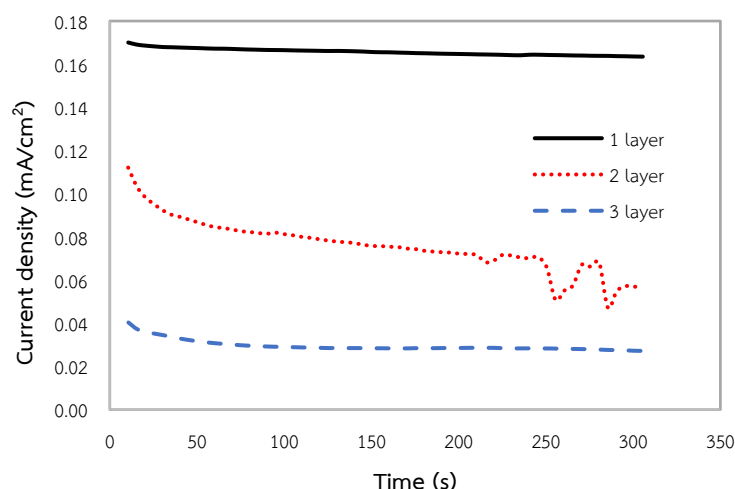


รูปที่ 6. กราฟ Nyquist Plot เปรียบเทียบผลของความหนาของแผ่นกั้นเซลล์แบตเตอรี่

ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาของการเปรียบเทียบผลของความหนาชั้นแผ่นกั้นเซลล์แบตเตอรี่แสดงดังรูปที่ 7 จากกราฟพบว่าเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นความหนา 1 ชั้น มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นอยู่ที่ 0.170 mA/cm^2 ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.164 mA/cm^2 เซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นความหนา 2 ชั้น ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นอยู่ที่ 0.112 mA/cm^2 แต่ในช่วงท้ายตั้งแต่วินาทีที่ 290 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีลักษณะไม่คงที่ และให้กระแสไฟฟ้าที่จุดสุดท้ายอยู่ที่ 0.057 mA/cm^2 และสุดท้ายเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นความหนา 3 ชั้น ให้แนวโน้มประสิทธิภาพเซลล์น้อยที่สุด โดยให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นอยู่ที่ 0.040 mA/cm^2 และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่จุดสุดท้ายอยู่ที่ 0.027 mA/cm^2 ซึ่งทั้งหมดเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกราฟโพลาริเซชัน และค่าการสูญเสียจากการทดสอบอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้า เซลล์ที่ใช้แผ่น

กันที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะสามารถลดการสูญเสียแบบโอห์มมิก และการสูญเสียจากการเกิดปฏิกิริยาได้ดี และสามารถทำให้ผลิตรกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า

สำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการลดลงของความหนาแน่นกระแสตลอดเวลา 5 นาที เซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นความหนา 1 ชั้น มีอัตราการลดลงโดยรวมเท่ากับ $2.20 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2 \cdot \text{s}$ เซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นความหนา 2 ชั้น มีอัตราการลดลงรวม $18.61 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2 \cdot \text{s}$ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากการใช้ 1 ชั้นกว่า 7 เท่าตัว และเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นความหนา 3 ชั้น มีอัตราการลดลงรวม $4.44 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2 \cdot \text{s}$ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากการใช้ 1 ชั้นกว่า 1 เท่าตัว จะเห็นได้ว่าเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นความหนา 2 ชั้น มีอัตราการลดลงรวมมากที่สุด รวมทั้งมีความไม่สม่ำเสมอของการประสิทธิภาพในช่วงท้ายการทำงาน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มความหนาส่งผลต่อการส่งถ่ายไอออนอย่างชัดเจน นำไปสู่การเกิดส่งถ่ายมวลสารด้วยอัตราที่ลดลง และท้ายที่สุดจึงเกิดการเกิดปฏิกิริยาที่ลดลงและไม่สม่ำเสมอ [14] แต่สำหรับเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้นที่มีความหนามากจนเกินไปเช่น แผ่นกั้น 3 ชั้นนั้น ก็จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาลดลงอย่างมาก และทำให้อาจไม่แสดงการสูญเสียเนื่องจากการส่งถ่ายมวลสารอย่างชัดเจนทำให้เส้นข้อมูลสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามข้อได้เปรียบของการใช้เซลล์ที่มีแผ่นกั้น 1 ชั้นนั้นจะสามารถอธิบายได้ในขอบเขตการทดลองนี้เท่านั้น การเพิ่มระยะเวลาการศึกษาที่มากกว่าเดิมเพื่อสังเกตความหนาแน่นของเซลล์ที่ใช้โครงสร้างความหนาแตกต่างกัน ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต



รูปที่ 7. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา เปรียบเทียบผลของความหนาชั้นแผ่นกั้นเซลล์แบตเตอรี่

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ทำได้คือเซลล์ที่ผสม CMC และใช้ความหนาแผ่นกั้น 1 ชั้น กับประสิทธิภาพเซลล์แบตเตอรี่ของงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 1 พบว่ายังมีค่าต่ำกว่าค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการวิจัยนี้มีองค์ประกอบของโครงสร้างเกือบทั้งหมดเป็นเพียงกระดาษและส่วนผสม CMC เท่านั้น ในขณะที่งานอื่นมีการผสมส่วนประกอบของโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติการส่งถ่ายไอออนและช่วยในการคงสภาพของรูปร่างได้ดีกว่า ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีข้อดีของการมีโครงสร้าง

ที่เรียบง่ายกว่า แต่ควรทำการปรับปรุงหาโครงสร้างทางเซลล์โลสอื่นมาผสมและขึ้นรูปให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นใกล้เคียงงานวิจัยอื่นต่อไป

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบองค์ประกอบและประสิทธิภาพเซลล์แบตเตอรี่

แอโนด	แคโทด	แผ่นกั้น	อิเล็กโทรไลต์	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (mW/cm ²)	งานวิจัย
Zn + ZnO + Bi ₂ O ₃ + carbon black	MnO ₂ + carbon black	Alkaline polymer gel electrolyte (PGE)	KOH	0.70 – 1.50	Lao-atiman et al. [13]
Zn + ZnO + SDVS + PTFE	MnO ₂ + graphite + PTFE	Celgard 3501 + Cellulosic fiber	NaOH	9.34 – 18.00	Duay et al. 2018 [14]
Zn + CMC	MnO ₂ + CMC	Filter Paper	KOH	0.02 - 0.05	งานวิจัยนี้

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองอิทธิพลของการผสม CMC ในขั้วอิเล็กโทรด พบว่าเซลล์ที่ผสม CMC ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.052 mW/cm² ในขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่ผสม CMC ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.032 mW/cm² เซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นจากเมื่อไม่ผสม 62.50 % เนื่องจากเซลล์แบตเตอรี่ที่ผสม CMC มีความสูญเสียทางโอห์มมิกน้อยกว่า เพราะการผสม CMC ทำให้สภาพขั้วอิเล็กโทรดยึดเกาะตัวกันได้ดีของผงสังกะสีหรือแมงกานีสออกไซด์กับ CMC และสามารถยึดเกาะหรือสัมผัสกับผิวของแผ่นกั้นเซลล์ได้ดี ส่งผลให้การส่งถ่ายไอออนภายในเซลล์และการส่งถ่ายอิเล็กตรอนที่ภายนอกเซลล์เกิดขึ้นได้ดีขึ้น และต่อเนื่องนำไปสู่ความสูญเสียเนื่องจากการกระตุ้นปฏิกิริยาที่ลดลงอีกด้วย นอกจากนี้การมีอยู่ของ CMC สามารถสร้างสภาพขั้วอิเล็กโทรดให้มีความคงทน ลดความรุนแรงของเดนไดรต์ และสามารถกักเก็บความชื้นไว้ในขั้วได้ ส่งผลให้สามารถรักษาระดับของการสร้างกระแสไฟฟ้าในช่วงการทดลองให้มีความสม่ำเสมอได้ยาวนานกว่า

ผลการทดลองอิทธิพลของความหนาแน่นแผ่นกั้นเซลล์ พบว่าเซลล์ที่ใช้แผ่นกั้น 1 ชั้นให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.052 mW/cm² เซลล์ที่ใช้แผ่นกั้น 2 ชั้น ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ารองลงมาเท่ากับ 0.029 mW/cm² เซลล์ที่ใช้แผ่นกั้น 3 ชั้น ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.022 mW/cm² การใช้แผ่นกั้นจำนวน 2 และ 3 ชั้น เซลล์จะให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลง 44.27 % และ 57.12 % ตามลำดับ เซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้แผ่นกั้นเซลล์ที่หนาขึ้นจะส่งผลต่อความสามารถของการส่งถ่าย OH⁻ จากขั้วแคโทดผ่านแผ่นกั้นไปยังขั้วแอโนด และนำไปสู่การสูญเสียในการทำปฏิกิริยามากขึ้นตามด้วย จึงเป็นการลดประสิทธิภาพของเซลล์

การประกอบเซลล์แบตเตอรี่มีความจำเป็นต้องศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในขั้วอิเล็กโทรดเพื่อให้มีสภาพเหมาะสมทางกายภาพที่จะนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เหมาะสม รวมทั้งต้องคำนึงถึงการ

ทำงานของเซลล์ในระยะเวลาที่ยาวนานด้วย องค์ความรู้ที่ได้นี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดแบตเตอรี่ขนาดพกพาต้นทุนต่ำ ที่มีส่วนประกอบเซลล์เป็นกระดาษและสารประกอบเซลล์โลสต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-พระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง ผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย (รหัสทุนที่ SciEE 001/63)

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Wang, Y., Kwok, H., Pan, W., Zhang, H. and Leung, D.Y.C. 2019. Innovative paper-based Al-air batteries as a low-cost and green energy technology for the miniwatt market. *J. Power Sources*, 414, 278-282.
- [2] Nguyen, T.H., Fraiwan, A. and Choi, S. 2014. Paper-based batteries: A review. *Biosens Bioelectron*, 54, 640-649.
- [3] Hilder, M., Winther-Jensen, B. and Clark, N.B. 2009. Paper-based, printed zinc-air battery. *J. Power Sources*, 194, 1135-1141.
- [4] Hu, L., Wu, H., Mantia, F.L., Yang, Y. and Cui, Y. 2010. Thin, flexible secondary Li-ion paper batteries. *ACS Nano*, 4(10), 5843-5848.
- [5] Ferreira, I., Brás, B., Martins, J.I., Correia, N., Barquinha, P., Fortunato, E. and Martins, R. 2011. Solid-state paper batteries for controlling paper transistors. *Electrochim. Acta*, 56(3), 1099-1105.
- [6] Thom, N.K., Lewis, G.G., DiTucci, J. and Phillips, S.T. 2013. Two general designs for fluidic batteries in paper-based microfluidic devices that provide predictable and tunable sources of power for on-chip assays. *RSC Adv*, 3, 6888-6895.
- [7] Roy, N., Saha, N., Kitano, T. and Saha, P. 2012. Biodegradation of PVP-CMC hydrogel film: A useful food packaging material. *Carbohydr. Polym*, 89, 346-353.
- [8] Abd El-Mohdy, H.L. and Ghanem, S. 2009. Biodegradability, antimicrobial activity and properties of PVA/PVP hydrogels prepared by γ -irradiation. *J. Polym. Res.*, 16, 1-10.
- [9] Samsudin, A.S., Lai, H.M. and Isa, M.I.N. 2014. Biopolymer materials based carboxymethyl cellulose as a proton conducting biopolymer electrolyte for application in rechargeable proton battery. *Electrochim. Acta*, 129, 1-13.
- [10] Samsudin, A.S., Lai, H.M. and Isa, M.I.N. 2014. Biopolymer materials based carboxymethyl cellulose as a proton conducting biopolymer electrolyte for application in rechargeable proton battery. *Electrochim. Acta*, 129, 1-13.

- [11] Lee, C.W., Sathiyarayanan, K., Eom, S.W., Kim, H.S. and Yun, M.S. 2006. Effect of additives on the electrochemical behavior of zinc anodes for zinc/air fuel cells. *J. Power Sources*, 160, 161-164.
- [12] Puapattanakul, A., Therdthianwong, S., Therdthainwong, A. and Wongyao, N. 2013. Improvement of Zinc-air fuel cell performance by gelled KOH. *Energy Procedia*, 34, 173-180.
- [13] Lao-atiman, W., Julaphatachote, T., Boonmongkolras, P. and Kheawhom, S. 2017. Printed Transparent Thin Film Zn-MnO₂ Battery. *J. The Electrochemical Society*, 164(4), A859-A863.
- [14] Duay, J., Kelly, M. and Lambert, T.N. 2018. Evaluation of a ceramic separator for use in rechargeable alkaline Zn/MnO₂ Batteries. *J. Power Sources*, 395, 430-438.