

Research Article



การเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄)

Enhancement of Aluminum-Air Battery Performance using Combined Electrolyte Solutions Between Sodium Chloride and Ferrous Sulfate (FeSO₄)

นิศย์ นามวงษ์¹ และ ชัยภัทร เครือหงส์^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมืองขอนแก่น ขอนแก่น 40002

² สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมืองขอนแก่น ขอนแก่น 40002

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมรวมทั้งปรับปรุงปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (ORR) ของขั้วแคโทดและการเพิ่มความจุพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งทำการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของขั้วอะลูมิเนียมและขั้วแคโทดโดยใช้เครื่อง SEM และ EDS ผลการศึกษาพบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมทำให้เกิดชั้นฟิล์มสีเหลืองที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล็กเคลือบบนพื้นผิวของขั้วอะลูมิเนียมและสามารถลดการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมได้ ส่วนขั้วแคโทดพบว่าการสะสมผลึกของธาตุที่มีองค์ประกอบของโซเดียมน้อยกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ นอกจากนี้การวิเคราะห์พฤติกรรมการเข้าสู่ออกซิเจนของขั้วแคโทดด้วยวิธีแคโทดิกโพลาไรเซชันยังพบว่าการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมช่วยปรับปรุงการเข้าสู่ออกซิเจนของขั้วแคโทดให้ดีขึ้น โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (mAcm⁻²) ให้ค่าความจุพลังงานสูงถึง 1,543 มิลลิแอมป์ต่อชั่วโมงต่อกรัม (mAhg⁻¹) ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมสามารถเพิ่มความจุพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศได้สูงกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียวถึง 1.4 เท่า

Received:

14 May 2023

Revised:

12 Jun 2023

Accepted:

14 Jun 2023

Published:

18 Jun 2023

Corresponding*Author:**

chaikr@kku.ac.th

Copyright:

© Rajamangala
University of
Technology Lanna.
All right reserved

ISSN

Print: 2586-8500

Electronic: 2586-8632

คำสำคัญ: ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน อิเล็กโทรไลต์ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย แอนโอดิกโพลาไรเซชัน แคโทดิกโพลาไรเซชัน แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ

Abstract

This research aims to reduce the corrosion of the aluminum anode as well as to improve the oxygen reduction reaction (ORR) of the cathode and to increase the specific capacity of aluminum-air batteries by using combined electrolyte solutions between sodium chloride (NaCl) and ferrous sulfate (FeSO_4) in different electrolyte ratios. The electrochemical tests were conducted in combined electrolyte solutions at room temperature. The structure and chemical composition of the surface of the anode and cathode after tests were analyzed by SEM and EDS. The results showed that the combined electrolyte solutions formed a yellow film containing iron on the surface of the aluminum anode and could reduce the corrosion of the aluminum anode. While the cathode, the crystal formation of sodium-containing elements was lower than that of the sodium chloride solution. In addition, the cathodic polarization analysis of the cathode showed that the use of combined electrolyte solutions improved the oxygen reduction reaction (ORR) of the cathode. This allows the battery cells to have a higher specific capacity. The mixed electrolyte solutions at a ratio of 95:5 at a constant current density of 5 mAcm^{-2} causing the specific capacity to reach $1,543 \text{ mAhg}^{-1}$. The combined electrolyte solutions can increase the specific capacity of the aluminum-air battery by 1.4 times higher than that of the sodium chloride solution alone.

Keywords: Oxygen reduction reaction, Aqueous electrolyte, Energy density, Anodic polarization, Cathodic polarization, Aluminum-air battery

1. บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังเร่งค้นหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลังงานหลักจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง แบตเตอรี่โลหะอากาศ (Metal-air Battery) เป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานเคมีที่เก็บไว้ในโลหะโดยตรงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งกำลังได้รับความสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Rahman et al. 2013, Liu et al. 2020) และในบรรดาแบตเตอรี่โลหะอากาศ แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ (Aluminium-air battery) เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นพลังงานทางทฤษฎีสูง ($8,100 \text{ Wh kg}^{-1}$) (Liu et al. 2017) อีกทั้งอะลูมิเนียมยังเป็นโลหะที่มีมากที่สุดในเปลือกโลก (Grishina et al. 2016, Egan et al. 2013) ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Liu et al. 2017, Goel et al. 2020) สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนสำคัญต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกลาง เช่น สารละลายของเกลือโซเดียมคลอไรด์ นิยมนำมาใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศเช่นเดียวกับสารละลายต่าง เพราะมีการนำไฟฟ้าที่ดี หาได้ง่าย ราคาไม่แพง แต่อัตราการกัดกร่อนตัวเองของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่ำกว่าสารละลายต่างเป็นอย่างมาก จึงทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่สูงได้ (Mokhtar et al. 2015, Pino et al. 2016) และการปลดปล่อยพลังงานในระยะยาวทำให้เกิดผลึกโซเดียมคาร์บอเนตอุดตันที่ขั้วแคโทด (Li et al. 2002) ส่งผลให้พื้นที่ผิวของคาร์บอนที่ขั้วแคโทดลดลงจนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้การปลดปล่อยพลังงานของแบตเตอรี่สิ้นสุดลง ในขณะที่ขั้วอะลูมิเนียมยังถูกใช้ไม่หมด จากสภาพปัญหาดังกล่าวจึงมีการศึกษาการใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ซึ่งเป็นสารละลายเหล็กที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วแคโทด (Telli et al. 2018, Gong et al. 2013, Moradi et al. 2015) โดยพบว่าสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ทำให้ขั้วแคโทดมีพื้นผิวและโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น จึงช่วยเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดได้อย่างดี นอกจากนี้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ยังนิยมนำมาใช้เพื่อลดการกัดกร่อนภายในท่อถ่ายเทความร้อน (Castle et al. 1976) และลดการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิลทองแดงจากน้ำทะเลได้ (Chauhan & Gadiyar. 1985) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าส่วนใหญ่จะใช้สารละลายเหล็กเพื่อปรับปรุงการเร่งปฏิกิริยาของขั้วแคโทด แต่สำหรับการใช้สารละลายเหล็กเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าและการเพิ่มความจุพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศโดยใช้สารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ร่วมกันในสัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้อะลูมิเนียมอัลลอยด์เชิงพาณิชย์เกรด 8011 ที่หาได้ง่ายมาใช้เป็นขั้วแอโนด และใช้วัสดุนาโนคาร์บอนรูพรุนหุ้ม (CNOs) ที่ผลิตได้ง่าย และมีปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (ORR) ที่ดี (Nit Namwong & Chaiyaput Kruehong. 2022, Pathak & Sharma. 2021) เป็นขั้วแคโทด ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะช่วยให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับสารละลายเหล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ ซึ่งจะช่วยให้เป็นแนวทางในการพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมรวมทั้งปรับปรุงปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (ORR) ของขั้วแคโทดและการเพิ่มความจุพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยมีโลหะผสมอะลูมิเนียมเชิงพาณิชย์ต้นกุนต่ำเกรด 8011 เป็นขั้วแอโนดและวัสดุคาร์บอนรูพรุนหุ้ม (CNOs) เป็นขั้วแคโทด

3. แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การคำนวณค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศโดยใช้ค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่ (Specific capacity) ได้รับความนิยามกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิจัยเกี่ยวกับแบตเตอรี่ ซึ่งค่าความจุพลังงานจะมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบปลดปล่อยพลังงานของขั้วแอโนด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) (Wang et al. 2019)

$$\text{ความจุพลังงาน (มิลลิแอมป์ชั่วโมงต่อกรัม)} = \frac{Ih}{\Delta m} \quad (1)$$

เมื่อ I คือ ความหนาแน่นกระแสในการปลดปล่อยพลังงานของแบตเตอรี่ (มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) h คือ เวลาในการทดสอบ (ชั่วโมง) และ Δm คือ ผลต่างของน้ำหนักของขั้วแอโนดก่อนและหลังการทดสอบ (กรัม)

3.2 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ

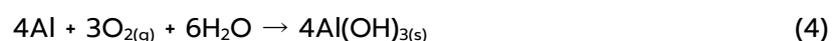
ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดคือปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน โดยขั้วแคโทดจะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนซึ่งออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะทำปฏิกิริยากันดังสมการที่ (2) (Tamez & Yu. 2007, Farsak & Kardas. 2018)



ไฮดรอกไซด์ไอออนจะเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวและจะละลายอยู่ในบริเวณใกล้กับขั้วแคโทดซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนจะลดลงไปเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยแผ่นอะลูมิเนียมจะเสียอิเล็กตรอนดังสมการที่ (3) (Tamez & Yu. 2007, Farsak & Kardas. 2018)



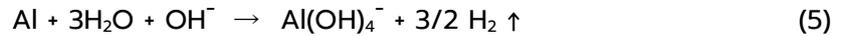
อะลูมิเนียมและไฮดรอกไซด์ไอออนถูกใช้ในปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดและแอโนดสามารถพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังสมการที่ (4) (Tamez & Yu. 2007, Farsak & Kardas. 2018)



โดยประสิทธิภาพของเซลล์จะค่อยๆลดลงตามระยะเวลาเนื่องจากที่ขั้วแอโนดจะถูกเคลือบด้วยสารประกอบออกไซด์และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ

3.3 การกัดกร่อนตัวเองของขั้วอะลูมิเนียม

ปฏิกิริยาปรสิต (Parasitic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนตัวเองของขั้วอะลูมิเนียม (Self-corrosion) ในขณะที่อะลูมิเนียมสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยอะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนดังปฏิกิริยาในสมการที่ (5) (Wang et al. 2010)



4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

อะลูมิเนียมอัลลอยด์เชิงพาณิชย์ เกรด 8011 ถูกใช้เป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดสามารถเตรียมได้จากวัสดุคาร์บอนรูปทรงห่อหุ้มที่ถูกสังเคราะห์บนแผ่นนิกเกิลโพลีเมอร์โดยการเผาไหม้เป็นเวลา 50 วัน และควบคุมขนาดของขั้วแอโนดและขั้วแคโทดให้เท่ากับ 1 ตารางเซนติเมตร และ 2 ตารางเซนติเมตรตามลำดับและวัสดุคาร์บอนรูปทรงห่อหุ้มที่ใช้เป็นขั้วแคโทดในงานวิจัยนี้มีมวล 0.49 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยข้อมูลในการเตรียมขั้วไฟฟ้าดังกล่าวอาศัยข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Saifon Kruehong et al. 2015, Nit Namwong & Chaiyaput Kruehong. 2022)

4.2 การทดสอบทางเคมีไฟฟ้า

ศึกษาพฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าของขั้วแอโนดและขั้วแคโทดด้วยวิธีแอโนดิกโพลาริเซชัน (Anodic polarization) และวิธีแคโทดิกโพลาริเซชัน (Cathodic polarization) ตามลำดับ โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) ยี่ห้อ Gamry รุ่น Reference 600 (R600) การทดสอบนี้จะต่อเซลล์ไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง อะลูมิเนียมและวัสดุคาร์บอนรูปทรงห่อหุ้มเคลือบบนแผ่นนิกเกิลโพลีเมอร์เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) และควบคุมให้ขนาดของพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ (Exposed area) ของขั้วทำงานเท่ากับ 1 ตารางเซนติเมตร ขดลวดแพลตตินัมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ความยาว 5 เซนติเมตร เป็นขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode) (Wang et al. 2015, Nit Namwong & Chaiyaput Kruehong. 2022) และแผ่นซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ในการทดลองทุกครั้งจะต้องทำการทดสอบศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential) เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงทำการทดสอบด้วยวิธีแอโนดิกโพลาริเซชันและวิธีแคโทดิกโพลาริเซชัน

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศสามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีกัลวานอสแตติก (Galvanostatic) การทดสอบนี้เป็นการต่อเซลล์ไฟฟ้าแบบ 2 ขั้ว โดยใช้เซลล์ขวดแก้วที่มีช่องเปิดเพื่อรับออกซิเจนอย่างอิสระจากภายนอก และทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยใช้แผ่นนิกเกิลโพลีเมอร์ที่เคลือบด้วยวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร เป็นขั้วแคโทด โดยควบคุมให้พื้นที่ของแคโทดที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 2 ตารางเซนติเมตร และแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 1 x 2.5 เซนติเมตร เป็นขั้วแอโนด โดยควบคุมให้พื้นที่ของแอโนดที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร (Nit Namwong & Chaiyaput Kruehong. 2022) และทำการทดสอบการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแส 1 และ 5 มิลลิ

แอมปีต่อตารางเซนติเมตร (mAcm^{-2}) (คำนวณได้จากสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ใช้เทียบกับขนาดของพื้นที่ของอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดสอบ) เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell voltage) และค่าความจุพลังงาน (Specific capacity)

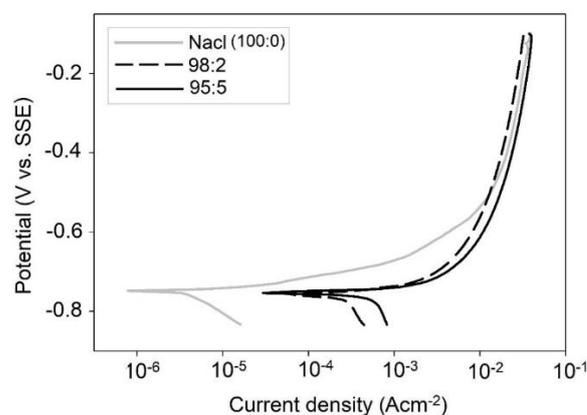
4.4 การทดสอบทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของพื้นผิว

พื้นผิวของขั้วแอโนดที่เวลาต่าง ๆ จะได้รับการวิเคราะห์โดยใช้กล้องดิจิทัล (Oppo A5) ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวขั้วแอโนดและขั้วแคโทดได้รับการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, Carl Zeiss Model Auriga) การวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) ได้รับการตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL Model JSM-6010LV)

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

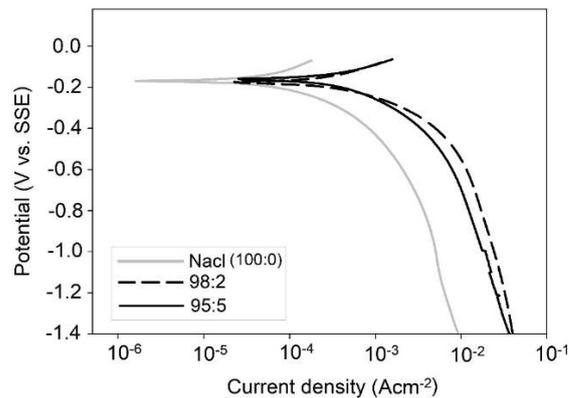
5.1 พฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าของขั้วในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสม

รูปที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าที่สะท้อนถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของขั้วแอโนดด้วยวิธีแอโนดิกโพลาไรเซชันในสารละลายที่ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) เท่ากับ 98:2 และ 95:5 เทียบกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ผลการทดสอบพบว่าขั้วแอโนดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมมีค่าศักย์ไฟฟ้าขณะเกิดการกัดกร่อน (Corrosion potential) อยู่ที่ -0.752 V vs. SSE ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (-0.746 V vs. SSE) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า -0.72 V ถึง -0.20 V vs. SSE สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมจะมีค่าความหนาแน่นกระแสสูงกว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในช่วงแรกแต่ต่อมาจะมีค่าความหนาแน่นกระแสใกล้เคียงกันโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 98:2 มีความหนาแน่นกระแสต่ำที่สุด พฤติกรรมนี้บ่งชี้ว่าการสลายตัวของอะลูมิเนียมที่มากกว่าจะทำให้เกิดฟิล์มที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล็กเคลือบบนพื้นผิวขั้วแอโนดซึ่งสามารถการกัดกร่อนได้ (Castle et al. 1976, Chauhan & Gadiyar. 1985) จึงเป็นข้อดีของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่จะช่วยลดการกัดกร่อนของขั้วแอโนด ทำให้ระยะเวลาการปลดปล่อยพลังงานยาวนานขึ้น ส่งผลต่อค่าความจุพลังงานให้สูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 1 แอโนดิกโพลาไรเซชันของขั้วแอโนดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

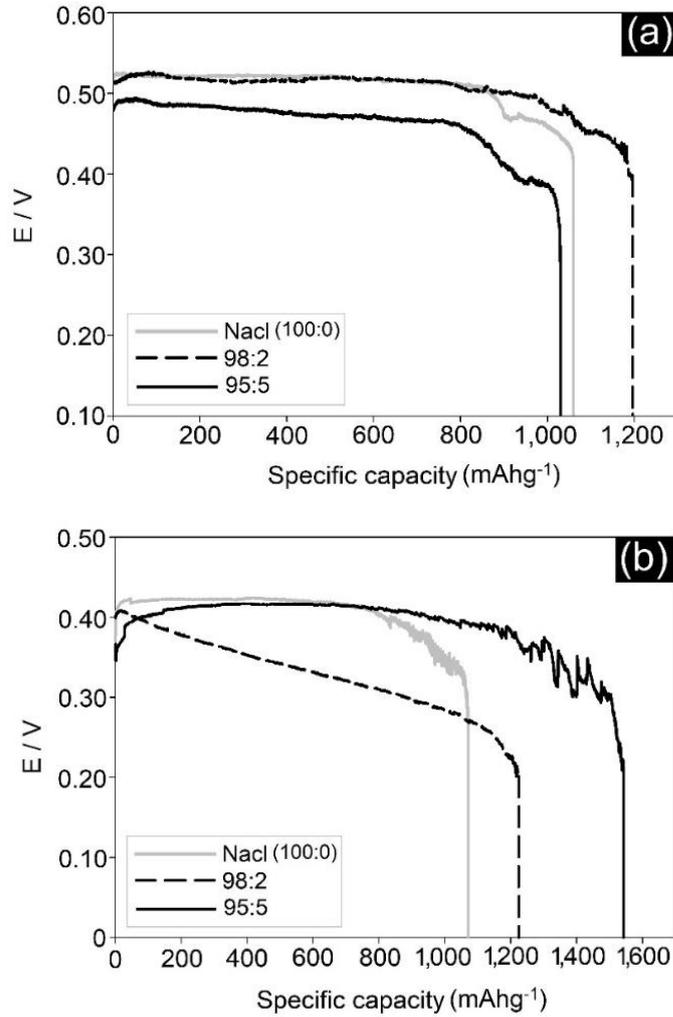
รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าที่สะท้อนถึงพฤติกรรมการเข้ารีบออกซิเจนของขั้วแคโทดด้วยวิธีแคโทดิกโพลาไรเซชันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 98:2 และ 95:5 เทียบกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ผลการทดสอบพบว่าในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.25 V ถึง -0.50 V vs. SSE คือช่วงที่มีการใช้ออกซิเจนบนพื้นผิวของขั้วแคโทด (Nit Namwong & Chaiyaput Kruehong, 2022) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมมีความหนาแน่นกระแสสูงกว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ สิ่งนี้บ่งชี้ว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนของขั้วแคโทดสูงกว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะส่งผลให้ระยะเวลาในการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ยาวนานขึ้น



รูปที่ 2 แคโทดิกโพลาไรเซชันของขั้วแคโทดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

5.2 ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ

รูปที่ 3 (a) แสดงพฤติกรรมของการปลดปล่อยพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 98:2 และ 95:5 เทียบกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยทดสอบที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 1 mA cm^{-2} ผลการทดสอบพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 98:2 มีค่าเฉลี่ย 0.49 โวลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (0.49 โวลต์) แต่มีระยะเวลาการปลดปล่อยพลังงานที่ยาวนานกว่าคือ 43.05 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (40.27 ชั่วโมง) จึงทำให้มีค่าความจุพลังงานสูงถึง $1,196$ mAhg^{-1} แต่สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 มีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย 0.44 และมีค่าความจุพลังงานอยู่ที่ $1,030$ mAhg^{-1} ซึ่งต่ำกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 98:2 และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ($1,060$ mAhg^{-1}) แต่สำหรับการทดสอบที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 5 mA cm^{-2} (รูปที่ 3 (b)) พบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 มีค่าความจุพลังงานสูงถึง $1,543$ mAhg^{-1} (11.73 ชั่วโมง) ซึ่งสูงกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 98:2 และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งค่าความจุพลังงานดังกล่าวมีความสอดคล้องกับอัตราการกัดกร่อนที่ลดลงของขั้วแอโนดดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 การปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมในอากาศที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วนต่าง ๆ (a) ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 1 mAcm⁻² และ (b) ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 5 mAcm⁻²

ตารางที่ 1 อัตราการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 8011 ในสารละลายต่าง ๆ ขณะที่มีการจ่ายกระแสในวงจร

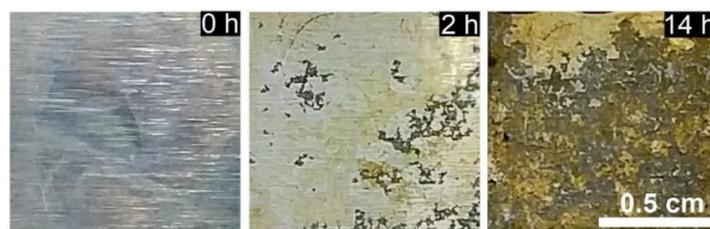
ชนิดของสารละลาย	สัดส่วน	อัตราการกัดกร่อน (mgcm ⁻² day ⁻¹)	
		ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย (1 mAcm ⁻²)	ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย (5 mAcm ⁻²)
NaCl	100:0	0.0221	0.1123
NaCl+FeSO ₄	98:2	0.0211	0.0972
NaCl+FeSO ₄	95:5	0.0240	0.0770

ตารางที่ 1 แสดงผลการกัดกร่อนของแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 1 และ 5 mAcm⁻² พบว่าความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 1 mAcm⁻² จะอะลูมิเนียมในสารละลายอิเล็ก

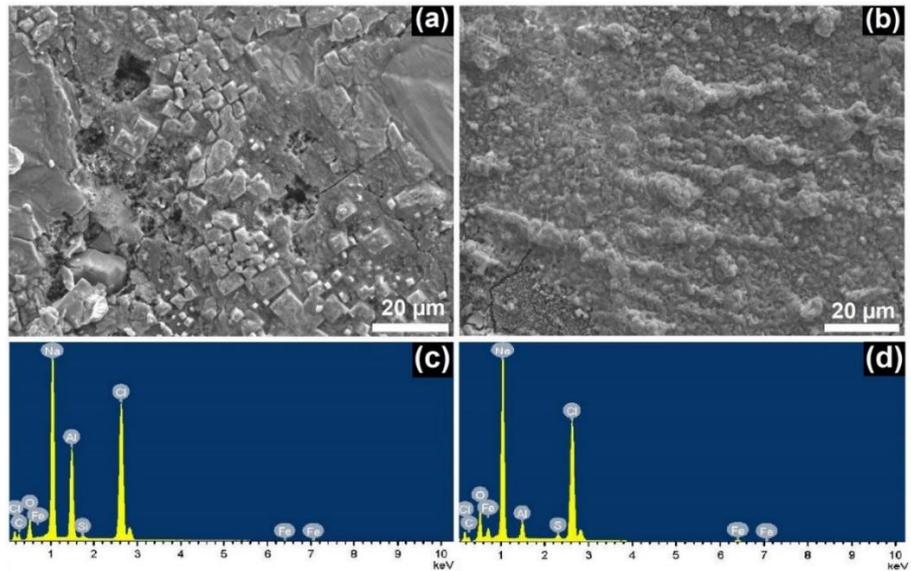
โพลีเอทิลีนที่สัดส่วน 98:2 มีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด แต่สำหรับที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 5 mAcm^{-2} กลับพบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 มีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด ซึ่งต่ำกว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1.46 เท่า ซึ่งอัตราการกัดกร่อนที่วัดได้หลังจากการปลดปล่อยพลังงานของแบตเตอรี่เป็นอัตราการกัดกร่อนที่เกิดจากการกัดกร่อนตัวเองของอะลูมิเนียมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ร่วมกับการกัดกร่อนที่เกิดจากการบังคับให้มีการปลดปล่อยกระแส หากมีการควบคุมความหนาแน่นกระแสปลดปล่อยให้มีการกัดกร่อนที่เกิดจากการบังคับที่ต่ำ ในบางกรณีอาจทำให้การกัดกร่อนตัวเองของอะลูมิเนียมสูงและมีการสูญเสียโดยไม่ทำให้เกิดพลังงาน แต่สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 ที่การควบคุมความหนาแน่นกระแสปลดปล่อยสูง (5 mAcm^{-2}) จะมีการกัดกร่อนตัวเองต่ำทำให้อะลูมิเนียมมีการสูญเสียที่น้อยลง ส่งผลให้ค่าพลังงานสูงขึ้น (รูปที่ 3 (b)) ดังนั้นการเลือกความหนาแน่นกระแสปลดปล่อยที่เหมาะสมจะสามารถลดการกัดกร่อนและเพิ่มค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศได้

5.3 ลักษณะกายภาพของขั้วอะลูมิเนียมและขั้วแคโทดหลังการปลดปล่อยพลังงาน

รูปที่ 4 แสดงสภาพพื้นผิวของขั้วอะลูมิเนียมหลังปลดปล่อยพลังงานที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 1 mAcm^{-2} ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 เป็นเวลา 0, 2 และ 14 ชั่วโมง พบว่ามีฟิล์มสีเหลืองคล้ายสนิมเหล็กเคลือบบนพื้นผิวของขั้วอะลูมิเนียม โดยฟิล์มดังกล่าวจะสามารถลดการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมได้ (Castle et al. 1976) และในกรณีที่มีการบังคับให้มีการปลดปล่อยกระแสที่สูงขึ้น (5 mAcm^{-2}) ฟิล์มดังกล่าวจะสามารถช่วยลดการกัดกร่อนตัวเองของขั้วอะลูมิเนียม ทำให้ระยะเวลาในการปลดปล่อยพลังงานยาวนานขึ้น และส่งผลให้ค่าพลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทคนิค EDS (รูปที่ 5) มีความสอดคล้องกับภาพถ่ายพื้นผิวของขั้วอะลูมิเนียม โดยพบว่าขั้วอะลูมิเนียมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 จะมีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ถึง 14.87 เท่า แต่สำหรับปริมาณธาตุโซเดียมจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน สิ่งนี้บ่งบอกได้ว่าการเติมสารละลายเหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่มีส่วนผสมของเหล็กก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวอะลูมิเนียม สามารถลดการกัดกร่อนขั้วอะลูมิเนียมทำให้แบตเตอรี่ทำงานได้ยาวนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบปลดปล่อยพลังงานตามรูปที่ 3



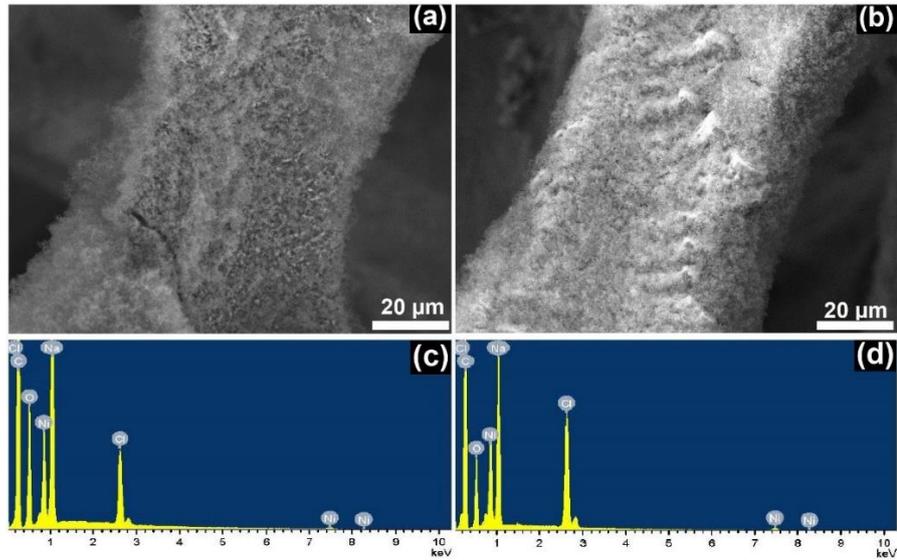
รูปที่ 4 สภาพพื้นผิวของขั้วอะลูมิเนียมหลังปลดปล่อยพลังงานที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 1 mAcm^{-2} ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 เป็นเวลา 0, 2 และ 14 ชั่วโมง



รูปที่	C	O	Al	Si	Fe	Na	Cl	S
(c)	9.88	7.23	12.69	0.41	0.77	26.56	42.47	-
(d)	5.97	11.44	2.62	-	11.45	27.23	40.12	1.18

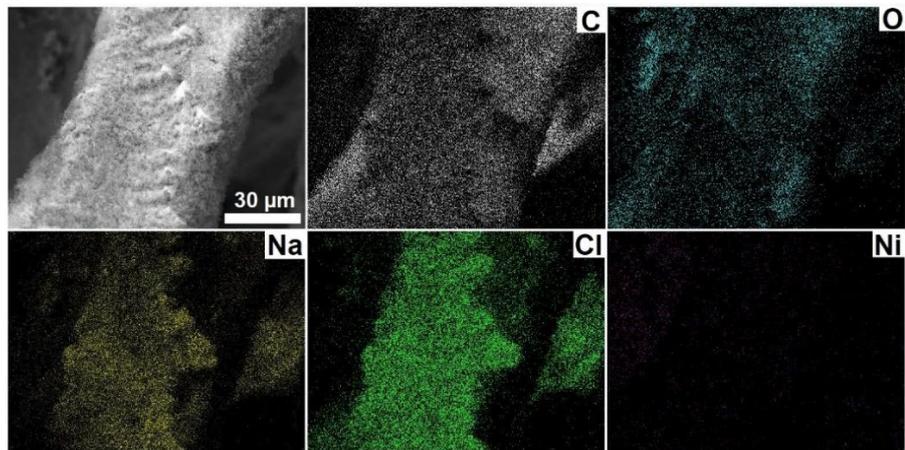
5 โครงสร้างพื้นผิวของซิวอะลูมิเนียมที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังปลดปล่อยพลังงานที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 5 mAcm^{-2} เป็นเวลา 30 นาที (a) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (b) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 และแผนภาพ EDS ของซิวอะลูมิเนียม (c) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และ (d) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5

สำหรับลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของสารผลิตภัณฑ์บนขั้วแคโทดที่เกิดขึ้นหลังจากการปลดปล่อยพลังงานที่ความหนาแน่นกระแส 5 mAcm^{-2} เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM และ EDS (รูปที่ 6) พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกันคือมีการก่อตัวของผลึกของธาตุที่มีองค์ประกอบของโซเดียมบนพื้นผิวขั้วแคโทดโดยกระจายตัวและแทรกอยู่ร่วมกับวัสดุคาร์บอน และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนขั้วแคโทด จะเห็นได้ว่าขั้วแคโทดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 จะมีปริมาณธาตุโซเดียมต่ำกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1.3 เท่า ซึ่งธาตุโซเดียมนั้นมีความเป็นไปได้ว่าเป็นสารประกอบประเภทฟลักคาร์บอนหรือโซเดียมคลอไรด์ สิ่งนี้บ่งบอกได้ว่าการเติมสารละลายเหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทำให้การก่อตัวของผลึกของธาตุที่มีองค์ประกอบของโซเดียมบนขั้วแคโทดลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนของขั้วแคโทดดีขึ้น ทำให้แบตเตอรี่ทำงานได้ยาวนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบปลดปล่อยพลังงานตามรูปที่ 3 นอกจากนี้การกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนพื้นผิวของขั้วแคโทดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 ยังแสดงได้ดังรูปที่ 7 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์บนพื้นผิวขั้วแคโทดคือคลอรีน และโซเดียม



	C	O	Na	Cl	Ni
(c)	56.66	12.97	12.17	7.01	11.20
(d)	56.83	9.76	9.06	12.39	11.95

รูปที่ 6 โครงสร้างพื้นผิวของขั้วแคโทดที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังปลดปล่อยพลังงานที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 5 mAcm⁻² เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (a) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (b) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 และแผนภาพ EDS ของขั้วแคโทด (c) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (d) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5



รูปที่ 7 การกระจายตัวขององค์ประกอบทางเคมีของธาตุต่างๆ วิเคราะห์ด้วยวิธี EDS mapping บนพื้นผิวของขั้วแคโทดหลังปลดปล่อยพลังงานที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 5 mAcm⁻² เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมกับงานวิจัยอื่นที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

แอโนด/ แคโทด	อิเล็กโทรไลต์	ชนิดของ แบตเตอรี่	ค่าความ หนาแน่น กระแส ปลดปล่อย (mAcm ⁻²)	ค่า ศักย์ไฟฟ้า เฉลี่ย (V)	ความจุ พลังงาน (mAhg ⁻¹)	ความ หนาแน่น พลังงาน (Whkg ⁻¹)	อ้างอิง
Al foil/ carbon composite	12 wt% NaCl	สารละลาย (Solution)	0.005	0.6	128	77	Choi et al. 2017
Al-CB/ carbon- MnO ₂	2M NaCl	สารละลาย (Solution)	1	0.65	630	410	Pino et al. 2016
Al foil / carbon paper	4M NaCl	เซลล์แบบ กระดาษ (Paper based cell)	1	0.52	1,600	832	Wang et al. 2019
Al alloy (cold rolled)/ MnO ₂	2M NaCl	สารละลาย (Solution)	20	1.29	2,449	3,165	Xiong et al. 2016
Al alloy/ CNOs	NaCl+FeSO ₄ (98:2)	สารละลาย (Solution)	1	0.42	1,196	501	Present work
	NaCl+FeSO ₄ (95:5)		5	0.39	1,543	600	

การเปรียบเทียบค่าพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมกับงานวิจัยอื่นที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์พบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 98:2 และ 95:5 สามารถปลดปล่อยพลังงานที่ความหนาแน่นกระแสในช่วง 1-5 mAcm⁻² โดยมีค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศอยู่ในช่วง 1,100-1,500 mAhg⁻¹ ซึ่งมีค่าสูงกว่างานวิจัยที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียว (128 mAhg⁻¹ (Choi et al. 2017), 630 mAhg⁻¹ (Pino et al. 2016)) แต่ความสามารถในการกักเก็บพลังงานดังกล่าวยังมีค่าต่ำกว่างานวิจัยที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเซลล์แบบกระดาษ (1,600 mAhg⁻¹ (Wang et al. 2019)) และงานวิจัยที่มีผลการกักต้อนอะลูมิเนียมโดยการเติมโลหะผสมและปรับขนาดเกรนของอะลูมิเนียมโดยการรีดเย็น (2,449 mAhg⁻¹ (Xiong et al. 2016)) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้ในอนาคต

6. บทสรุป

แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายเหล็กเฟอรัสซัลเฟต (FeSO₄) ร่วมกันที่สัดส่วนต่าง ๆ สามารถลดการกักต้อนตัวเองของขั้วอะลูมิเนียมและเพิ่มความสามารถในการเข้าสู่ออกซิเจนของขั้วแคโทด ส่งผลให้แบตเตอรี่มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานเพิ่มขึ้น ปริมาณความหนาแน่นกระแสปลดปล่อยและความเข้มข้นของสารละลายเหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บพลังงาน เมื่อสัดส่วนของสารละลายเหล็กในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ผสมมีค่าต่ำ (สัดส่วน 98:2) แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศจะทำงานได้ดีในช่วงความหนาแน่นกระแสปลดปล่อยต่ำ (1 mAcm⁻²) โดยมีค่าความจุพลังงานสูงสุด 1,196 mAhg⁻¹ และในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่มีความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมากขึ้น ความสามารถในการปลดปล่อยกระแสก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมที่สัดส่วน 95:5 สามารถให้ค่าความจุพลังงานสูงถึง 1,543 mAhg⁻¹ ที่ความหนาแน่นกระแสปลดปล่อย 5 mAcm⁻² เห็นชัดเจนว่าการ

ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ทำให้แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศสามารถเก็บพลังงานได้สูงกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถนำความรู้ที่ได้รับจากการวิจัยในครั้งนี้ไปต่อยอดโดยการศึกษาร่วมกับชีวแอโนดจากอะลูมิเนียมเกรดอื่นๆ หรือชีวแคโทดจากวัสดุนาโนคาร์บอนประเภทอื่นๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศและประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้ในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนการศึกษาระดับปริญญาเอก ของนายนิติย์ นามวงษ์ และขอขอบคุณคุณอุตุหนุณทั่วไพบ วิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้สนับสนุนการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- Castle, J. E., Epler, D. C., & Peplow, D. B. (1976). ESCA investigation of iron-rich protective films on aluminium brass condenser tubes. *Corrosion Science*, 16(3), 145–157. [https://doi.org/10.1016/0010-938x\(76\)90055-x](https://doi.org/10.1016/0010-938x(76)90055-x)
- Chauhan, P. K., & Gadiyar, H. S. (1985). An xps study of the corrosion of cu-10 ni alloy in unpolluted and polluted sea-water; the effect of feso4 addition. *Corrosion Science*, 25(1), 55–68. [https://doi.org/10.1016/0010-938x\(85\)90088-5](https://doi.org/10.1016/0010-938x(85)90088-5)
- Choi, S., Lee, D., Kim, G., Lee, Y. Y., Kim, B., Moon, J., & Shim, W. (2017). Shape-reconfigurable aluminum-air batteries. *Advanced Functional Materials*, 27(35), 1702244. <https://doi.org/10.1002/adfm.201702244>
- Egan, D. R., Ponce de León, C., Wood, R. J. K., Jones, R. L., Stokes, K. R., & Walsh, F. C. (2013). Developments in electrode materials and electrolytes for aluminium–air batteries. *Journal of Power Sources*, 236, 293–310. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.01.141>
- Farsak, M., & Kardaş, G. (2018). Electrolytic Materials. In *Comprehensive Energy Systems* (pp. 329–367). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00225-X>
- Goel, P., Dobhal, D., & Sharma, R. C. (2020). Aluminum–air batteries: A viability review. *Journal of Energy Storage*, 28(101287), 101287. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101287>
- Gong, Q.-J., Li, H.-J., Yao, C.-Z., Zhang, S.-Y., Li, K.-Z., & Wang, C. (2013). Catalytic growth of multi-wall carbon nanotubes on carbon cloth using powdery ferrous sulfate heptahydrate as catalyst precursor. *New Carbon Materials*, 28(6), 421–427. [https://doi.org/10.1016/s1872-5805\(13\)60091-8](https://doi.org/10.1016/s1872-5805(13)60091-8)
- Grishina, E., Gelman, D., Belopukhov, S., Starosvetsky, D., Groysman, A., & Ein-Eli, Y. (2016). Improvement of aluminum-air battery

- performances by the application of flax straw extract. *ChemSusChem*, 9(16), 2103–2111.
<https://doi.org/10.1002/cssc.201600298>
- Li, Q., & Bjerrum, N. J. (2002). Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review. *Journal of Power Sources*, 110(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(01\)01014-x](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(01)01014-x)
- Liu, Q., Pan, Z., Wang, E., An, L., & Sun, G. (2020). Aqueous metal-air batteries: Fundamentals and applications. *Energy Storage Materials*, 27, 478–505. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.12.011>
- Liu, Y., Sun, Q., Li, W., Adair, K. R., Li, J. & Sun, X. (2017). A comprehensive review on recent progress in aluminum–air batteries. *Green Energy Environ*, 2(3), 246–277. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2017.06.006>
- Mokhtar, M., Talib, M. Z. M., Majlan, E. H., Tasirin, S. M., Ramli, W. M. F. W., Daud, W. R. W., & Sahari, J. (2015). Recent developments in materials for aluminum–air batteries: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 32, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.08.004>
- Moradi, L., Najafi, G. R., & Saeidiroshan, H. (2015). New method for preparation of MWCNT-SO₃Has an efficient and reusable catalyst for the solvent-free synthesis of 3,4-dihydropyrimidin-2(1H)-ones/thiones. *Iranian Journal of Catalysis*, 5(4), 357–364.
- Nit Namwong & Chaiyaput Kruehong. (2022). Chain-like carbon nano-onions from candle flame combustion as a high-performance cathode for aluminum-air batteries. *Diamond and Related Materials*, 129(109396), 109396. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109396>
- Pathak, A. D., & Sharma, C. S. (2021). Candle soot carbon cathode for rechargeable Li-CO₂-Mars battery chemistry for Mars exploration: A feasibility study. *Materials Letters*, 283, 128868. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128868>
- Pino, M., Herranz, D., Chacón, J., Fatás, E., & Ocón, P. (2016). Carbon treated commercial aluminium alloys as anodes for aluminium-air batteries in sodium chloride electrolyte. *Journal of Power Sources*, 326, 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.06.118>
- Rahman, M. A., Wang, X., & Wen, C. (2013). High energy density metal-air batteries: A review. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(10), A1759–A1771. <https://doi.org/10.1149/2.062310jes>
- Saifon Kruehong, Chaiyaput Kruehong, Prinya Chindaprasirt, & Apichart Artnaseaw (2015). Candle flame synthesis and

- electrochemical behavior of chain-like carbon nano-onions on 304 stainless steel. *Chiang Mai J. Sci.*, 42(3), 745-751.
- Tamez, M., & Yu, J. H. (2007). Aluminum-Air Battery. *Journal of Chemical Education*, 84(12), 1936A.
- Telli, E., & Özer, D. (2018). Fe-Cu coated nickel mesh usage as cathode catalyst for hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(15), 7366–7371. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.183>
- Wang, H., Leung, D. Y., Leung, M. K., & Ni, M. (2010). Modeling of parasitic hydrogen evolution effects in an aluminum-air cell. *Energy & fuels*, 24(7), 3748-3753. <https://doi.org/10.1021/ef901344k>
- Wang, M., Lai, Y., Fang, J., Li, J., Qin, F., Zhang, K., & Lu, H. (2015). N-doped porous carbon derived from biomass as an advanced electrocatalyst for aqueous aluminium/air battery. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(46), 16230–16237. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.054>
- Wang, Y., Kwok, H. Y. H., Pan, W., Zhang, H., Lu, X., & Leung, D. Y. C. (2019). Parametric study and optimization of a low-cost paper-based Al-air battery with corrosion inhibition ability. *Applied Energy*, 251(113342), 113342. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113342>
- Wang, Y., Kwok, H. Y. H., Pan, W., Zhang, Y., Zhang, H., Lu, X., & Leung, D. Y. C. (2020). Printing Al-air batteries on paper for powering disposable printed electronics. *Journal of Power Sources*, 450(227685), 227685. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227685>
- Xiong, H., Yin, X., Yan, Y., Dai, Y., Fan, S., Qiao, X., & Yu, K. (2016). Corrosion and discharge behaviors of Al-mg-Sn-Ga in different solutions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(8), 3456–3464. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2172-7>