

# ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมในสารละลายผสม ระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมคลอไรด์

## Performance of Aluminum-Air Battery in Mixed Solutions between NaOH and NaCl

วิชพล มานาดิ<sup>1</sup> ชัยภัทร เครือหงส์<sup>2\*</sup> สายฝน เครือหงส์<sup>2</sup> อภิชาติ อัจฉนาเสียว<sup>2</sup> พนมกร ขาวทอง<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*Corresponding Author, E-mail: chaikr@kku.ac.th, c.kruehong@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมในสารละลายผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมคลอไรด์ที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบและวิเคราะห์การกัดกร่อนตัวเองของขั้วอะลูมิเนียม และทดสอบทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายผสมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อีกทั้งวิเคราะห์พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าหลังการทดสอบด้วยเครื่อง SEM และ XRD ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการใช้สารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ช่วยลดการกัดกร่อนตัวเอง และช่วยเพิ่มความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศได้มากกว่าเซลล์ที่ใช้สารละลายต่างเพียงอย่างเดียวถึง 6 เท่า ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของปฏิกิริยาที่คอยกัดกินขั้วอะลูมิเนียม และการลดลงของตะกอนคาร์บอเนตที่ขั้วอากาศ

**คำสำคัญ :** แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ สารละลายผสม การกัดกร่อนตัวเอง ความหนาแน่นพลังงาน

### Abstract

This research is aimed at studying the performance of aluminum-air battery at various mixed ratios of sodium hydroxide and sodium chloride solutions. The self-corrosion of Al anodes and electrochemical behavior of electrodes was tested in the mixed solutions at 25 °C. Surface Morphology and crystalline phases of the electrodes after the tests were characterized systematically by field emission scanning electron microscope and X-ray diffraction. The results indicate that the using of mixed solutions between sodium hydroxide and sodium chloride can significantly decrease the self-corrosion of Al anode and increase the energy density of aluminum-air battery by 6 folds compared with that of a conventional alkaline Al-air cell. These resulted from the decreasing of parasitic reaction at aluminum anode and the decreasing of carbonate precipitation at air electrode.

**Keywords :** aluminum-air battery, mixed solution, self-corrosion, energy density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

แบตเตอรี่โลหะอากาศ (Metal-air batteries) นับเป็นทางเลือกใหม่ของแบตเตอรี่ซึ่งให้ความหนาแน่นพลังงานสูงและมีต้นทุนต่ำ [1] อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและมีการออกแบบที่ไม่ยุ่งยาก [2] โดยแบตเตอรี่โลหะอากาศแบบลิเทียม (Lithium-air batteries) มีแนวโน้มการเก็บรักษาพลังงานในยานพาหนะไฟฟ้าทางทฤษฎีมากกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [3]-[5] แต่ลิเทียมเป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยบนโลกซึ่งปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้งานในปริมาณมาก [6] อะลูมิเนียมจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่ามาใช้ทดแทนลิเทียมเพื่อทำแบตเตอรี่โลหะอากาศ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายรีไซเคิลได้ ต้นทุนน้อย และมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาในระดับปานกลาง [7] อีกทั้งในทางทฤษฎีมีความหนาแน่นพลังงานสูงถึง 8,100 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม [8]

แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศจะผลิตพลังงานได้ต้องมีอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าแคโทดกับแอโนด ซึ่งประเภทของอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศโดยทั่วไปจะนิยมใช้ สารละลายต่าง [9] การใช้สารละลายต่างจะทำให้การนำไฟฟ้าที่ดีและสามารถละลายอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวได้ [10] อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายต่างทำให้เกิดการกัดกร่อนสูงที่ขั้วอะลูมิเนียมจึงทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง [11] อีกทั้งยังทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หรือเรียกว่าสถานะคาร์บอนชั่น (Carbonation) ที่ไปขัดขวางการแพร่ของอากาศที่ขั้วแคโทดทำให้ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าลดลง [12] ในปัจจุบันการลดปัญหาการกัดกร่อนที่ขั้วอะลูมิเนียมในสารละลายต่างทำได้หลายวิธี ดังเช่น การนำโลหะผสมอะลูมิเนียมมาใช้แทนอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ [13] การใช้อะลูมิเนียมที่มีความละเอียดของเกรนในโครงสร้างสูง [11] และการนำเซรามิกมาเคลือบบนพื้นผิวอะลูมิเนียม [14] เป็นต้น วิธีเหล่านี้สามารถลดปัญหาการกัดกร่อนที่ขั้วอะลูมิเนียมได้จึงทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น สำหรับแนวทางในการลดการเกิดสถานะคาร์บอนชั่นในปัจจุบันทำได้โดยลดความเข้มข้นของสารละลายต่างลงเพื่อ

ลดการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของขั้วสูงขึ้นแต่วิธีการนี้ทำให้ความหนาแน่นกำลังของแบตเตอรี่ลดลง [15] Lei Wang และคณะ [16] ได้เสนอแนวทางในการลดความเข้มข้นของต่างโดยการใช้สารละลายผสมระหว่างสารละลายต่างร่วมกับแอลกอฮอล์พบว่าสามารถลดการสลายตัวของขั้วและเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศได้ แต่แนวคิดดังกล่าวยังมีข้อจำกัดบางประการเนื่องจากสารละลายที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนผสมจะมีความต้านทานของสารละลายที่เพิ่มขึ้น [16] จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ในสารละลายต่างจะขึ้นกับสองปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลายต่างและส่วนผสมที่ใช้ในเซลล์แบตเตอรี่ สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การลดความเข้มข้นของสารละลายต่างโดยการผสมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เนื่องจากสารละลาย NaCl เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ดี และไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ขั้วบวก

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการลดการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมและการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้วแคโทดเพื่อเพิ่มระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่โดยการใช้สารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลาย NaCl มาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ยังไม่เคยมีการทดลองในลักษณะดังกล่าวมาก่อน ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนที่ขั้วลดลง อีกทั้งสามารถลดการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้วบวกได้

## 2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 การเตรียมแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นแกรไฟต์

เตรียมแผ่นอะลูมิเนียม (บริษัทอินเตอร์เอ็ดดูเคชั่นซัพพลายส์จำกัด ประเทศไทย) และแผ่นแกรไฟต์ (ห้างหุ้นส่วนจำกัดบีแอนด์บีอินเตอร์โปรดักส์ ประเทศไทย) ให้ได้ขนาดตามต้องการแล้วนำมาเคลือบด้านหลังด้วยกาวอีพอกซีจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง ขัดผิวด้านหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 แล้วจึงล้างทำความสะอาดพื้นผิวด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิคส์ (Ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 3 นาที ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เก็บไว้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การทดสอบการกัดกร่อนขั้ว

นำแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เตรียมตามข้อ 2.1 ขนาด 1.5 x 1.5 เซนติเมตร นำไปชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบแล้ว แช่ในสารละลายที่ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของสารละลาย NaOH กับ NaCl เท่ากับ 1:0 1:1 1:99 และ 0:1 เป็นเวลา 40 นาที ทิ้งไว้ให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักที่หายไปจากการกัดกร่อน จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่หายไป เวลาที่ใช้ และขนาดของชิ้นงานมาใช้คำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่สารละลายผสมสัดส่วนต่างๆ

## 2.3 การทดสอบทางเคมีไฟฟ้า

การทดสอบทางเคมีไฟฟ้าเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วอากาศทดสอบด้วยวิธี โพลาริเซชัน โดยใช้เครื่อง โปเทนชิโอสแตท ยี่ห้อ Gamry รุ่น reference 600 (R600) การทดสอบนี้จะต่อเซลล์แบบ 3 ขั้วไฟฟ้า และทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25 องศาเซลเซียส) โดยการทดสอบพฤติกรรมของขั้วอะลูมิเนียมทำโดยใช้ แผ่นอะลูมิเนียมขนาด 0.5 x 1 เซนติเมตรเป็นขั้วไฟฟ้า ทำงาน แผ่นแกรไฟต์ขนาด 1 x 1 เซนติเมตรเป็น ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม และซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) อิเล็กโทรดเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ในการทดลอง ทุกครั้งจะนำขั้วอะลูมิเนียมไปแช่ด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ 20 นาที แล้วล้างด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะใช้ในการศึกษาก่อนที่จะนำมาทดสอบ ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและทดสอบโพลาริเซชัน จากนั้นทำการทดสอบโดยแปรค่าสารละลายผสมระหว่าง NaOH 4 โมลาร์ กับ NaCl 4 โมลาร์ ที่สัดส่วน 1:0 และ 1:1 เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าในสารละลาย นั้นๆ สำหรับการทดสอบพฤติกรรมของขั้วอากาศจะนำ แผ่นแกรไฟต์ขนาด 0.5 x 1 เซนติเมตรมาใช้เป็นขั้วทำงาน โดยต่อเซลล์แบบ 3 ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกัน

## 2.4 การทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

การทดสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียม อากาศจะวิเคราะห์ด้วยวิธีกลวโนสแตติก การทดสอบนี้ต่อ เซลล์แบบ 2 ขั้วไฟฟ้า โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมขนาด 0.5 x 1 เซนติเมตรเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน และแผ่นแกรไฟต์ขนาด

1 x 1 เซนติเมตรเป็นขั้วไฟฟ้าตรงข้าม ควบคุมกระแสอยู่ที่ 1.0 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ทำการทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารละลายผสมระหว่าง NaOH 4 โมลาร์ กับ NaCl 4 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แปร ค่าสัดส่วนสารละลาย NaOH กับ NaCl ที่ 1:0 1:1 และ 1:99 เพื่อหาศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ระยะเวลาที่ขั้วสามารถ ปลดปล่อยกระแสไฟฟ้า ความจุของพลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน

## 2.5 การทดสอบลักษณะทางกายภาพ

การทดสอบลักษณะทางกายภาพของขั้วก่อนและหลังการ ทดลองอาศัยการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (scanning electron microscope—SEM) รุ่น LEO 1450 VP บริษัท LEO

## 2.6 การทดสอบโครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกบนพื้นผิวขั้วอากาศวิเคราะห์ด้วย เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Bruker D8 Advance XRD, Germany) ด้วยการฉายรังสีของ Cu และ K $\alpha$  ตั้งแต่ ช่วง 20° ถึง 40° ที่ 40 กิโลโวลต์ 40 มิลลิแอมป์

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

### 3.1 อัตราการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียม

อัตราการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมเป็นการ ทดสอบสภาพของขั้วอะลูมิเนียมในขณะที่ไม่มีภาระจ่าย กระแสในวงจร การทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบเพื่อ ศึกษาเสถียรภาพของขั้วอะลูมิเนียมในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่ ไม่เกิดการใช้งาน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่อะลูมิเนียมจะทำ ปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดก๊าซไฮโดรเจนซึ่ง เป็นปฏิกิริยาที่คอยกัดกินขั้วอะลูมิเนียมเสมือนตัวปรีสิตที่ ดำรงชีพอยู่ได้โดยการแก่งแย่งอาหารในร่างกายของสัตว์ ต่างๆ [15] ดังแสดงในสมการที่ (1)



ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการ กัดกร่อนขั้วอะลูมิเนียมที่ทำให้สภาพขั้วอะลูมิเนียม เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมในสารละลาย NaOH สารละลาย NaCl และสารละลายผสมระหว่างสารละลาย NaOH กับสารละลาย NaCl ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าขั้วอะลูมิเนียมในสารละลาย NaCl มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อยที่สุด ส่วนสารละลาย NaOH เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงที่สุดและเกิดก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมาก สำหรับการใช้สารละลายผสมระหว่าง NaOH กับ NaCl ที่สัดส่วน 1:99 พบว่าสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้มากถึง 12 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้สารละลาย NaOH เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้อัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายผสมระหว่าง NaOH กับ NaCl ที่สัดส่วน 1:99 มีค่าต่ำกว่าการใช้สารละลายผสมระหว่าง NaOH กับแอลกอฮอล์ หรือ โลหะผสมอะลูมิเนียมในสารละลาย NaOH ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นสารละลาย NaOH ผสมกับสารละลาย NaCl สามารถช่วยลดอัตราการกัดกร่อนที่ขั้วอะลูมิเนียมได้ ทำให้ขั้วอะลูมิเนียมคงสภาพการใช้งานได้นานยิ่งขึ้น

ตารางที่ 1 อัตราการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมที่สารละลายต่างๆ

สารละลาย (4 M)	สัดส่วน	น้ำหนักที่สูญเสีย (mg)	อัตราการกัดกร่อน ( $\text{mg cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ )
NaCl	0:1	0.2	0.10
NaOH	1:0	35.2	17.51
NaOH+NaCl	1:1	23.0	11.44
NaOH+NaCl	1:99	2.9	1.44
NaOH ethanol-10%water*	-	-	5.34
NaOH**	1:0	-	13.19

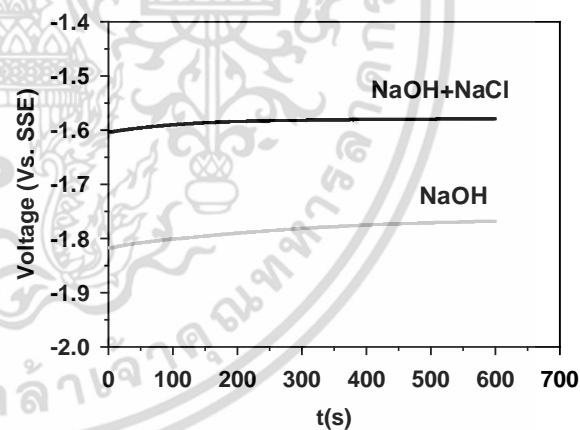
\* อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.9% [16]

\*\* โลหะผสมอะลูมิเนียม [17]

### 3.2 เสถียรภาพของขั้วอะลูมิเนียม

ขั้วอะลูมิเนียมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่าง NaOH กับ NaCl (1:1) ให้ศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดที่คงที่และมีเสถียรภาพดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลาย NaOH เพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย NaOH ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดของขั้วอะลูมิเนียมโดยจะทำให้ศักย์ไฟฟ้ามีความเป็นลบสูง เนื่องจากพื้นผิวของอะลูมิเนียมในสารละลาย NaOH มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าสารละลายชนิดอื่น สำหรับพื้นผิวอะลูมิเนียมในสารละลายผสมระหว่าง NaCl กับ NaOH ศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าเป็นลบต่ำกว่าสารละลาย NaOH สามารถอธิบายได้จากการลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายทำให้พื้นผิวของอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยาได้น้อยลง และหากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดที่เวลา 600 วินาที เทียบกับที่เวลาเริ่มต้นพบว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดของขั้วอะลูมิเนียมในสารละลาย NaOH และสารละลายผสมระหว่าง NaOH กับ NaCl มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.05 และ 0.02 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดของขั้วอะลูมิเนียมในสารละลายผสมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการทดสอบในสารละลาย NaOH และบ่งชี้ว่าพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีความเสถียรในสารละลายผสมมากกว่าสารละลาย NaOH



รูปที่ 1 ศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดของขั้วอะลูมิเนียมในสารละลายผสม 1:1 (สีดำ) และ NaOH (สีเทา)

### 3.3 พฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าของขั้วในสารละลายผสม

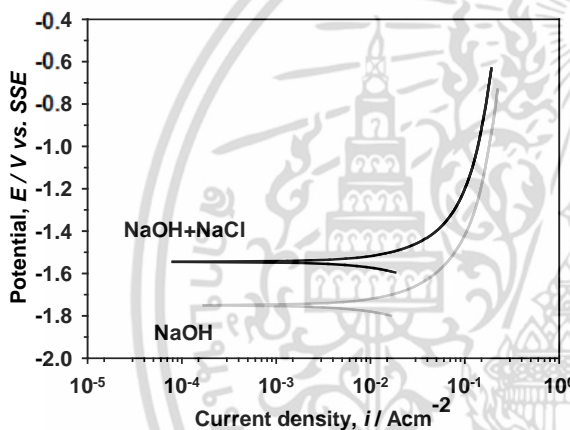
#### 3.3.1 ขั้วอะลูมิเนียม (aluminum anode)

รูปที่ 2 แสดงแอมโพลิตาโนดิกโพลาริเซชันของขั้วอะลูมิเนียมในสารละลาย เมื่อพิจารณาเส้นกราฟแอมโพลิตาโนดิกโพลาริเซชันของขั้วอะลูมิเนียมพบว่าสารละลายผสมมีค่า

ศักย์การกัดกร่อนเป็นลบต่ำกว่าเนื่องจากในระบบมีสารละลาย NaCl ทำให้ความเข้มข้นของด่างลดลงและเกิดผลิตภัณฑ์นิยมนไฮดรอกไซด์ [18] ดังสมการที่ (2)



อย่างไรก็ตามศักย์การกัดกร่อนในสารละลายผสมมีค่าใกล้เคียงกับในสารละลาย NaOH อีกทั้งแนวโน้มของเส้นกราฟมีความคล้ายคลึงกัน เนื่องจากได้รับอิทธิพลของสารละลาย NaOH ทำให้ฟิล์มไฮดรอกไซด์ที่ขั้วอะลูมิเนียมเกิดการสลายตัวดังสมการที่ (3)



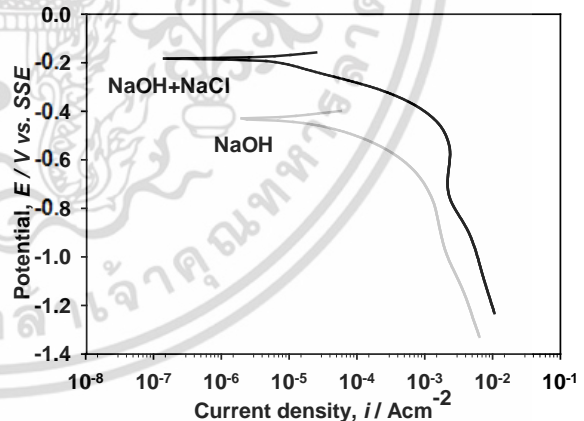
รูปที่ 2 แอโนดิกโพลาไรเซชันของขั้วอะลูมิเนียมในสารละลายผสม 1:1 (สีดำ) และ NaOH (สีเทา)

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นกระแสพบว่าในสารละลายผสมระหว่าง NaOH กับ NaCl (1:1) มีค่ากระแสที่ใกล้เคียงกับสารละลาย NaOH ดังนั้นความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วอะลูมิเนียมในสารละลายดังกล่าวจึงมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการเพิ่มค่าศักย์แอโนดิกทั้งกรณีของสารละลาย NaOH และสารละลายผสมพบว่าความหนาแน่นของกระแสถูกจำกัดด้วยค่ากระแสค่าหนึ่ง (limiting current platform) ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมักพบในสารละลายที่เป็นด่าง [13]

### 3.3.2 ขั้วอากาศ (Air cathode)

รูปที่ 3 แสดงกราฟแคโทดิกโพลาไรเซชันของแผ่นแกรไฟต์ที่ใช้เป็นขั้วอากาศในสารละลายผสมเปรียบเทียบกับ NaOH พบว่าความหนาแน่นกระแสของขั้วอากาศในสารละลายผสมมีค่าความหนาแน่นกระแสมากกว่า NaOH บ่งบอกได้ถึงความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของก๊าซออกซิเจนที่ขั้วอากาศในสารละลายผสมที่มีค่าความหนาแน่นกระแสมากกว่า ซึ่งผลดังกล่าวตรงข้ามกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่ขั้วอะลูมิเนียมแอโนด (รูปที่ 2)

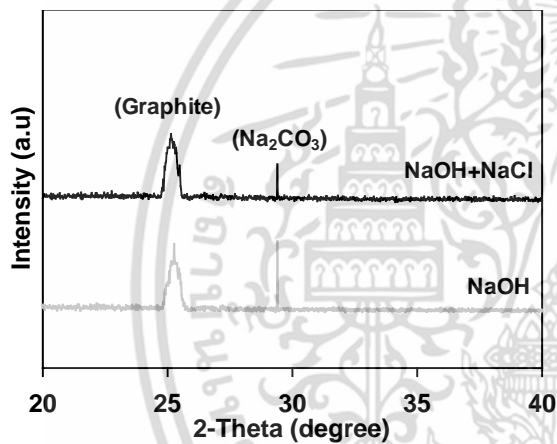
ในสารละลายด่างที่ขั้วอากาศจะมีปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอเนต [19] ดังแสดงในสมการที่ (4) การใช้สารละลายผสมจะเป็นการลดความเข้มข้นของด่างทำให้ลดการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอเนตที่พื้นผิวส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสของขั้วอากาศในสารละลายผสมมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอเนตที่พื้นผิวแกรไฟต์สามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD



รูปที่ 3 แคโทดิกโพลาไรเซชันของขั้วอากาศในสารละลายผสม 1:1 (สีดำ) และ NaOH (สีเทา)

รูปที่ 4 แสดงการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ใช้เป็นขั้วอากาศด้วยเครื่อง XRD ผลการทดสอบพบว่าค่าสัญญาณที่บ่งบอกถึงการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์คาร์บอเนตบนพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ใช้เป็นขั้วอากาศในสารละลายด่างจะมีค่าสูงกว่าในสารละลาย

ผสม ผลึกคาร์บอนดังกล่าวจะส่งผลให้ความสามารถในการรับออกซิเจนของขั้วอากาศลดลง จึงทำให้การรับอิเล็กตรอนบนพื้นผิวลดลงตามไปด้วย แต่สำหรับการสลายผสมระหว่าง NaOH กับ NaCl (1:1) นั้น พบว่าการลดปริมาณของสารละลายต่างได้มีส่วนช่วยในการแก้ไขการก่อตัวของผลึกโซเดียมคาร์บอเนตที่พื้นผิวของแกรไฟต์ได้อย่างชัดเจน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนที่ลดลงจะลดการเกิดผลึกโซเดียมคาร์บอเนตที่พื้นผิวแต่ไม่ได้ลดความสามารถในการทำงานของไอออนในสารละลายเนื่องจากปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่ลดลงในสารละลายผสมจะถูกชดเชยด้วยปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้น

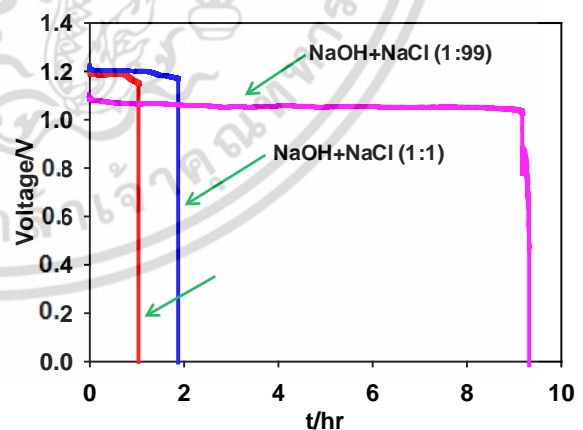


รูปที่ 4 XRD ของแผ่นแกรไฟต์ที่ใช้เป็นขั้วอากาศหลังจากทดสอบด้วยวิธีกัลวานอสแตติกที่ความหนาแน่นกระแส 1.0 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที สารละลายผสม (สีน้ำ) และ NaOH (สีเทา)

### 3.4 ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ

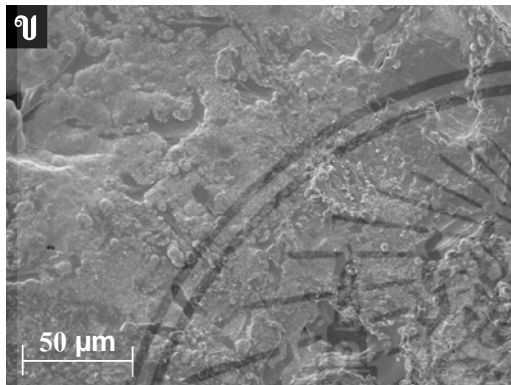
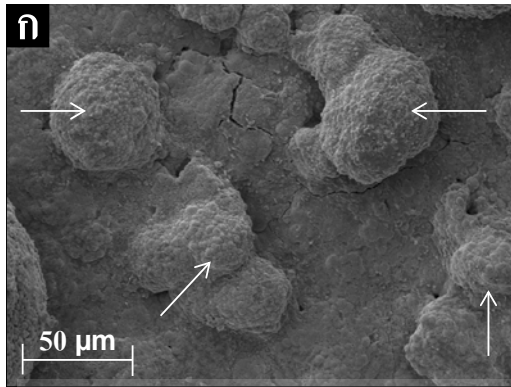
จากรูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลาย NaOH กับสารละลายผสมระหว่าง NaOH กับ NaCl (1:1) โดยควบคุมให้ขั้วอะลูมิเนียมปลดปล่อยพลังงานที่ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 1.0 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะให้ระยะเวลาในการปลดปล่อยพลังงานที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าความหนาแน่นพลังงานในสารละลาย NaOH เท่ากับ

23.73 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ส่วนในสารละลายผสมมีค่าเท่ากับ 29.71 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม แต่เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของสารละลาย NaCl ขึ้นเป็น 1:99 พบว่าค่าความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้นเท่ากับ 145.66 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมซึ่งสูงขึ้นเป็น 6 เท่า เมื่อเทียบกับสารละลาย NaOH นอกจากนี้เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเป็นเวลา 10 นาที มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อทิ้งให้สารละลายที่ใช้แห้งอยู่บนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า สภาพพื้นผิวของขั้วอะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบในสารละลาย NaOH มีสารผลิตภัณฑ์ปกคลุมอยู่ทั่วทั้งพื้นผิวและพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ปกคลุมอยู่มีรูปร่างคล้ายฟองก๊าซซึ่งน่าจะเกิดจากการก่อตัวของก๊าซไฮโดรเจน (ลูกศรสีขาว) ดังรูปที่ 6ก แต่สำหรับในสารละลายผสมพบว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพน้อยกว่าในสารละลาย NaOH ดังรูปที่ 6ข เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของสารละลาย NaCl ที่สูงขึ้นจะช่วยชะลอการเข้าทำปฏิกิริยาของไฮดรอกไซด์ไอออนที่คอยกัดกินเนื้ออะลูมิเนียมและลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (สมการที่ (1)) ส่งผลให้พื้นผิวของอะลูมิเนียมสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ดีขึ้น ระยะเวลาการปลดปล่อยพลังงานของแบตเตอรี่จึงสูงขึ้น



รูปที่ 5 พฤติกรรมการปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 1.0 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 6** ลักษณะทางกายภาพ (SEM) ของขี้เถ้าอะลูมิเนียม หลังจากการทดสอบวิธีกัลวานอสแตติกและปล่อยให้สารละลายแห้งอยู่บนพื้นผิว (ก) ใน NaOH และ (ข) สารละลายผสม (1:1)

จากงานวิจัยสามารถสรุปคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2 จากค่าที่แตกต่างกันนี้เป็นการชี้ชัดว่าประเภทของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของขี้เถ้าอะลูมิเนียมแอโนดและขี้เถ้าอากาศ เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าจากการทดลองพบว่าการใช้ขี้เถ้าอะลูมิเนียมในสารละลายผสมมีค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกับสารละลาย NaOH แต่สารละลายผสมมีความสามารถในการรักษาสภาพของพื้นผิวอะลูมิเนียมได้มากกว่าแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการทำงานของขี้เถ้าอะลูมิเนียมแอโนดและขี้เถ้าอากาศในสารละลายผสมมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย NaOH

**ตารางที่ 2** คุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศ

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	ค่าศักย์ไฟฟ้า (V)	เวลา (hr)	ความจุพลังงาน (mAh g <sup>-1</sup> )	ความหนาแน่นพลังงาน (Wh/kg)
NaOH	1.182	1.04	20.08	23.73
NaOH+NaCl (1:1)	1.198	1.89	24.81	29.71
NaOH+NaCl (1:99)	1.061	9.39	137.28	145.66

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบอัตราการกัดกร่อนและเสถียรภาพของขี้เถ้าอะลูมิเนียม พฤติกรรมเคมีไฟฟ้าของขี้เถ้าแอโนดและแคโทด รวมถึงประสิทธิภาพของการปลดปล่อยพลังงานของขี้เถ้าอะลูมิเนียมในสารละลาย NaOH เปรียบเทียบกับสารละลายผสมระหว่าง NaOH และ NaCl พบว่าในสารละลายผสมอัตราการกัดกร่อนตัวเองที่ขี้เถ้าอะลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าสารละลาย NaOH ถึง 12 เท่า ทำให้ขี้เถ้าอะลูมิเนียมมีเสถียรภาพมากกว่าโดยที่พฤติกรรมเคมีไฟฟ้าของขี้เถ้าอะลูมิเนียมในสารละลายผสมมีค่าใกล้เคียงกับสารละลาย NaOH นอกจากนี้ออกซิเจนในสารละลายผสมสามารถรับอิเล็กตรอนที่ขี้เถ้าอากาศได้ดีกว่าสารละลาย NaOH จากพฤติกรรมทั้งหมดทำให้สารละลายผสม (1:99) มีค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้นจากระบบที่ใช้สารละลาย NaOH ถึง 6 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่อะลูมิเนียมอากาศที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนบ่มเพาะนักวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.A. Rahman, X. Wang and C. Wen, "High energy density metal-air batteries: a review," Journal of The

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Electrochemical Society, Vol. 160, No. 10, pp. A1759-A1771, 2013.
- [2] J. Chen and F. Cheng, "Combination of lightweight elements and nanostructured materials for batteries," *Accounts of Chemical Research*, Vol. 42, No. 6, pp. 713–723, 2009.
- [3] P.G. Bruce, S. Freunberger, L.J. Hardwick and J.M. Tarascon, "Li-O<sub>2</sub> and Li-S batteries with high energy storage," *Nature Materials*, Vol. 11, pp. 19–30, 2012.
- [4] G. Girishkumar, B. McCloskey, A.C. Luntz, S. Swanson and W. Wilcke, "Lithium-air battery: promise and challenges," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 1, pp. 2193–2203, 2010.
- [5] J.S. Lee, S.T. Kim, R. Cao, N.S. Choi, M. Liu, K.T. Lee and J. Cao, "Metal-air batteries with high energy density: Li-air versus Zn-air," *Advanced Energy Materials*, Vol. 1, pp. 34–50, 2011.
- [6] L. Fan and H. Lu, "The effect of grain size on aluminum anodes for Al-air batteries in alkaline electrolytes," *Journal of Power Sources*, Vol. 284, pp. 409–415, 2015.
- [7] S. Yang and H. Knickle, "Design and analysis of aluminum/air battery system for electric vehicles," *Journal of Power Sources*, Vol. 112, pp. 162–173, 2002.
- [8] X. Zhang and S.H. Yang, "Novel operation and control of an electric vehicle aluminum/air battery system," *Journal of Power Sources*, Vol. 128, pp. 331–342, 2004.
- [9] D. Gelman, I. Lasman and S. Elfimchev, "Aluminum corrosion mitigation in alkaline electrolytes containing hybrid inorganic/organic inhibitor system for power sources applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 285, pp. 100–108, 2015.
- [10] D. Linden and T.B. Reddy, "Handbook of Batteries," McGraw-Hill, Vol. 3, pp. 38.30, 2001.
- [11] L. Fan, H. Lu and J. Leng, "Performance of fine structured aluminum anodes in neutral and alkaline electrolytes for Al-air batteries," *Electrochimica Acta*, Vol. 165, pp. 22–28, 2015.
- [12] Q. Li and N.J. Bjerrum, "Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review," *Journal of Power Sources*, Vol. 110, No. 1, pp. 1–10, 2002.
- [13] J. Ma, J. Wen, J. Gao and Q. Li, "Performance of Al–0.5 Mg–0.02 Ga–0.1 Sn–0.5 Mn as Anode for Al-Air Battery," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 161, pp. A376–A380, 2014.
- [14] R. Mori, "A new structured aluminium–air secondary battery with a ceramic aluminium ion conductor," *Royal Society of Chemistry*, Vol. 3, pp. 11547–11551, 2013.
- [15] L. Wang, W. Wang, G. Yang, D. Liu, J. Xuan, H. Wang, M. K.H. Leung and F. Liu, "A hybrid aluminum/hydrogen/air cell system," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 34, pp. 14801–14809, 2013.
- [16] M. Jingling, W. Jiuba, Z. Hongxi and Q. Li, "Electrochemical performances of Al-0.5Mg-0.1Sn-0.02In alloy in different solutions for Al-air battery," *Journal of Power Sources*, Vol. 293, pp. 592–598, 2015.
- [17] J. Ma, J. Wen, J. Gao and Q. Li, "Performance of Al-1Mg-1Zn-0.1Ga-0.1Sn as anode for Al-air battery," *Electrochimica Acta*, Vol. 129, pp. 69–75, 2014.
- [18] M. Tamez and J.H. Yu, "Aluminum–Air Battery," *Journal of Chemical Education*, Vol. 84, No. 12, pp. 1936A–1936B, 2007.
- [19] M. Hyland, "Light Metals 2015," *Proceedings of the symposia sponsored by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2015 Annual Meeting and Exhibition*, pp. 149, 2015.