

การพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ โดยใช้สารอินทรีย์

Development of Energy Storage Technology using Organic Redox Battery

อดิศร ทยมา^{1*}

Adisorn Thomya^{1*}

^{1*}คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 119 ถนนลำปาง - แม่ทะ บ้านหนองหัวหงอก หมู่ที่ 9 ตำบลชมพู
อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52100 โทร 08 0496 5738 โทรสาร 0 5424 1079 E-mail: adisorn2@hotmail.com

^{1*}Faculty of Industry Technology Lampang Rajabhat University

119 Moo 9, Lampang - Mae Tha Road, Chompoo Subdistrict, Mueang Lampang District, Lampang Province,
Thailand 52100

วันที่รับบทความ 8 ธันวาคม 2566

Received: Dec. 8, 2023

วันที่รับแก้ไขบทความ 20 ธันวาคม 2566

Revised: Dec. 20, 2023

วันที่ตอบรับบทความ 20 ธันวาคม 2566

Accepted: Dec. 20, 2023

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่แน่นอน เช่น พลังงานลม และแสงอาทิตย์ ทำให้อุปกรณ์เก็บพลังงานมีความจำเป็นในการรักษาคุณภาพไฟฟ้า และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดต้นแบบและวัดประสิทธิภาพ ของรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งชุดต้นแบบรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ มีส่วนประกอบ ได้แก่ แผ่นปิดที่ทำจากอะลูมิเนียม, แผ่นสะสมกระแสที่ทำจากทองเหลือง, ช่องไหลที่เป็นแกรไฟต์ และเยื่อเลือกผ่าน Nafion® 117 ที่ถูกพ่นด้วย Pt/C 20% โดยใช้เทคนิคการพ่นแบบอัลตราโซนิกส์ และมี anthraquinone-2-sulfonic acid (AQS) และ 1,2-benzoquinone-3,5-disulfonic acid (BQDS) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้อาโนด และแคโทดตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของช่องการไหลแบบ Parallel Channel ที่ Stage of Charge (SOC) ที่ 100% พบว่าอัตราการไหลที่ 300 ml/min มีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าอัตราการไหลที่ 400 และ 500 ml/min อยู่ที่ 2.31V และที่อัตราการไหล 500 ml/min มีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 231.36 mA ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของช่องการไหลแบบ Serpentine Channel ที่ SOC 100% พบว่า อัตราการไหลที่ 500 ml/min มีแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 1.59 V และที่อัตราการไหลที่ 400 ml/min มีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 484.75 mA ผลของการทดสอบพบว่าที่ช่องการไหลแบบ Serpentine Channel ที่อัตราการไหล 500 จะมีสมรรถนะของเซลล์รีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ดีที่สุด เพราะว่ามีค่ากำลังไฟฟ้าได้จะมีสมรรถนะ

การทำงานของเซลล์รีดอกซ์โฟลว์แบตเตอรี่ที่ดีที่สุด มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 19.2 mW และกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.04 แอมแปร์ ที่ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 55.81

คำสำคัญ: รีดอกซ์โฟลว์แบตเตอรี่, สารอินทรีย์, ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า, สรรถณะ

Abstract

The demand and installation capacity for alternative intermittent energy sources such as photovoltaic and wind energy are increasing, but such energy sources require a secondary power source such as a battery to maintain grid reliability and power quality. This research aimed to develop the prototype and evaluate the performance of an organic electrolyte redox flow battery. The redox flow battery prototype in this study was made of aluminum endplates, a brass current collector, a graphite flow field, and a Nafion® 117 membrane coated with Vulcan carbon using the ultrasonic spray technique. Anthraquinone-2-sulfonic acid (AQS) and 1,2-benzoquinone-3,5-disulfonic acid (BQDS) were used as the anode and cathode organic electrolytes, respectively.

The results of comparing the flow rate of the parallel channel at Stage of Charge (SOC) at 100% showed that the flow rate of 300 mL/min had a higher voltage than the flow rates of 400 and 500 mL/min. At 2.31V, and a flow rate of 500 mL/min, the maximum current was 231.36 mA. Comparing the flow rate of the Serpentine Channel SOC at 100%, it was found that the flow rate of 500 mL/min had the highest voltage equal to 1.59 V, and the flow rate of 400 mL/min had the highest current of 484.75 mA. The Serpentine Channel test, at a flow rate of 500 mL/min, had the best redox flow battery cell performance. Due to its power value, it had the best performance of the redox flow battery cells. With an electric power of 19.2 mW and a maximum current of 0.04 amperes, it possessed an electric potential efficiency of 55.81%.

Keywords: Redox flow batteries, Organic matters, Voltage efficiency, Performance

1. บทนำ

แบตเตอรี่แบบกรดตะกั่ว เป็นที่นิยมในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ แต่มีข้อเสียในเรื่องของอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ประมาณ 5 ปี และเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อหมดอายุการใช้งานจากกรดตะกั่ว ทำให้มีการศึกษางานวิจัยหาแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้ารูปแบบใหม่เพื่อทดแทนแบตเตอรี่แบบกรดตะกั่ว ซึ่งจากการศึกษามีหลากหลายเทคโนโลยี

โดยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ในปี ค.ศ.2014 Yang, B. และคณะ ได้ทำการศึกษารีดอกซ์แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นสารอินทรีย์ หรือ Organic Redox Flow Battery (ORBAT) โดยมีอิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลาย 1,2-benzoquinone-3,5-disulfonic acid (BQDS) ในขั้วบวกหรือขั้วแคโทด และสารละลาย anthraquinone-2-sulfonic acid (AQS) ในขั้วลบหรือขั้วแอโนด มีแกรไฟต์เป็นแผ่นปิด มีพื้นที่ทำปฏิกิริยา 25 cm^2 มีอัตราการไหลของอิเล็กโทรไลต์ $0.5 - 1.0 \text{ L/min}$ และมี Nafion 117 เป็นเยื่อเลือกผ่านพบว่า เมื่อใช้สารละลาย BQDS ความเข้มข้น 0.2 M และ AQS ความเข้มข้น 0.2 M ที่ State Of Charge 100% และอัตราการไหล 250 mL/min จะมีศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 0.7 V และศักย์ไฟฟ้าลดลงเหลือประมาณ 0.3 V เมื่อจ่ายกระแสประมาณ 17 mA จากนั้นทำการเปลี่ยนสารเคมีในขั้วลบจาก AQS เป็น AQDS ที่ความเข้มข้นเท่าเดิม พบว่า ที่ State Of Charge 100% และอัตราการไหล $1,000 \text{ mL/min}$ จะมีศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ประมาณ 0.75 V และเมื่อดึงกระแสประมาณ 25 mA จะมีศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.1 V โดยจะมีความหนาแน่นกำลังสูงสุดที่ประมาณ 5.25 mW/cm^2 นอกจากนี้ยังพบว่า แบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาไม่แพงมากนัก เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ไม่ใช่โลหะหนัก และไม่ต้องใช้โลหะเป็น Catalyst โดยคิวโนนมีความสามารถในการเก็บประจุประมาณ 500 Wh/kg และมีราคาประมาณ $\$5-10/\text{kg}$ หรือ $\$10-20/\text{kWh}$ ซึ่งทำได้ตามเป้าหมายของ US Department of Energy ที่กำหนดราคาไว้ไม่เกิน $\$100/\text{kWh}$ ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีทั้งในด้านราคาและการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในปี ค.ศ. 2017 (Anurak et al., 2017) ได้ทำการสร้างและวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของชุดต้นแบบรีดอกซ์แบตเตอรี่ ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งใช้ anthraquinone-2-sulfonic acid (AQS) และ 1,2-benzoquinone-3,5-disulfonic acid (BQDS) เป็นอิเล็กโทรไลต์ในด้านแอโนดและแคโทดตามลำดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดต้นแบบและวัดประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นสารอินทรีย์ ที่มีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ 0.2 M 0.15 M 0.1 M และ 0.05 M และมีกระแสไฟฟ้าที่ใช้อัดและคายประจุ 0.125 A , 0.250 A , 0.375 A และ 0.5 A แล้วทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพประจุ ประสิทธิภาพแรงดัน และประสิทธิภาพพลังงาน ของรีดอกซ์แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นสารอินทรีย์ ศักยภาพของรีดอกซ์แบตเตอรี่ ที่ SOC ตั้งแต่ 0.9 ถึง 0.5 พบว่า ที่ SOC 0.9 รีดอกซ์แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 80 mA/cm^2 และมีกำลังสูงสุด 8 mW/cm^2 โดยกระแสและกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงเมื่อค่า SOC ของแบตเตอรี่ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านทานของ อิเล็กโทรไลต์ยังเปลี่ยนเมื่อค่า SOC ของรีดอกซ์แบตเตอรี่เปลี่ยนแปลง โดยค่าความต้านทานของ แบตเตอรี่จะแปรผกผันกับค่า SOC ของรีดอกซ์แบตเตอรี่ ตัวอย่างเช่น ที่ SOC 0.9 รีดอกซ์แบตเตอรี่มีความต้านทาน 0.25 โอห์ม และเพิ่มขึ้นเมื่อค่า SOC ของรีดอกซ์แบตเตอรี่ลดลง โดยที่ SOC 0.5 รีดอกซ์แบตเตอรี่มีความต้านทาน 1.8 โอห์ม

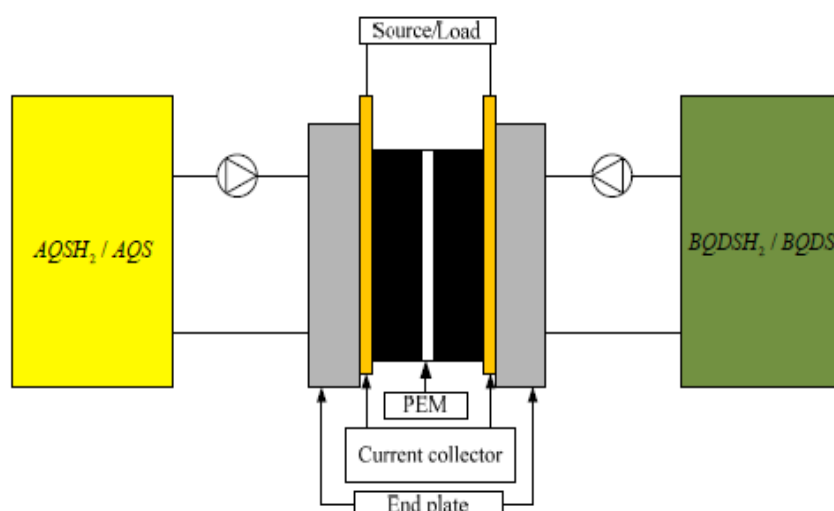
งานวิจัยจะทำการการศึกษาและพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานรีดอกซ์โพลีเมอร์ แบตเตอรี่ที่ใช้ anthraquinone-2-sulfonic acid (AQSH) และ 1,2-benzoquinone-3,5-disulfonic acid (BQDSH) เป็นสารตั้งต้น โดย AQSH และ BQDSH เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีอันตรายต่อมนุษย์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แตกต่างจากรีดอกซ์แบตเตอรี่ชนิดอื่นที่เป็นสารพิษ ที่นอกจากจะตอบสนองการเพิ่มขึ้นในอนาคตของแหล่งพลังงานทดแทนที่มีความไม่แน่นอน เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมุ่งเน้นศึกษาการศึกษาช่องการไหลของสาร และอัตราการไหลของสารตั้งต้น ที่ส่งผลต่อการทำงานของรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ โดยใช้สารอินทรีย์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบสารเคมี เพื่อเพิ่มคุณภาพไฟฟ้าแก่ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบพลังงานทดแทนที่มีความไม่แน่นอน รวมไปถึงการรักษาคุณภาพไฟฟ้าแล้ว ยังลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

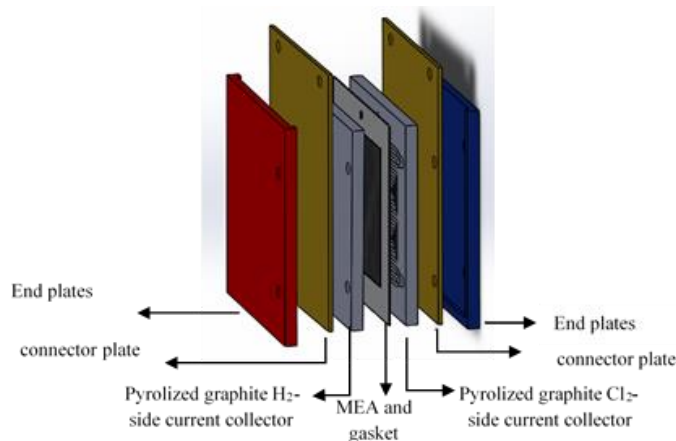
เพื่อศึกษาช่องการไหลของสารและอัตราการไหลของสารตั้งต้น ที่ส่งผลต่อการทำงานของรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่โดยใช้สารอินทรีย์

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่

การทำงานของรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ที่มีสารทำงานมี AQSH และ BQDSH ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิห้อง ทำงานโดยใช้ปั๊มสารทำงานผ่านช่อง Flow field ในขณะที่ทำการเก็บประจุ Charged และทำการคายประจุ Discharged ดังแสดงในภาพที่ 1

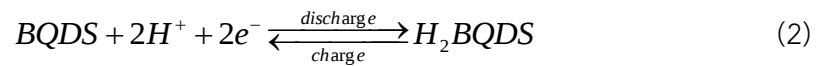
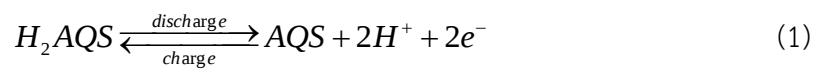


ภาพที่ 1 แผนผังการทำงานของรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ที่ใช้สารอินทรีย์ (Anurak et al., 2017)



ภาพที่ 2 แสดงส่วนประกอบในเซลล์เดี่ยว (Thomya and Khunatorn, 2020)

การอัดและคายประจุจะมีสมการที่ชั่วลบดังสมการที่ 1 และชั่วบวกดังสมการที่ 2 โดยเมื่อคายประจุ $AQSH_2$ ที่ชั่วลบจะแตกตัวเป็น AQS และ $2H^+$ โดย $2H^+$ จะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านไปรวมกับ $BQDS$ ได้ $BQDSH_2$ และเมื่ออัดประจุ $BQDSH_2$ จะแตกตัวเป็น $BQDS$ และ $2H^+$ โดย $2H^+$ จะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านไปรวมกับ AQS ได้สาร $AQSH_2$



รีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็น AQS และ $BQDS$ มีข้อด้อยคือมีศักย์ไฟฟ้าต่ำ โดยมีศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่ 0.86V และมีกระแสต่ำ ทำให้กำลังของเซลล์ต่ำตามไปด้วย แต่รีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็น AQS และ $BQDS$ มีข้อดีคือราคาไม่สูงมากนักเนื่องจากตัวเซลล์ไม่จำเป็นต้องใช้ แพลตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสารละลาย AQS และ $BQDS$ เป็นสารอินทรีย์ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ส่วนประกอบที่สำคัญของรีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่ที่มีสารทำงานเป็นสารอินทรีย์

การหาประสิทธิภาพการทำงานของรีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่ โดยทั่วไปการวัดประสิทธิภาพของรีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่ นิยมวัดจากประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า (Voltage Efficiency, η_v) แสดงถึงการลดลงของพลังงานศักย์เมื่อเทียบกับพลังงานศักย์ทางทฤษฎี ดังนั้นประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า ดังสมการที่ 3

$$\eta_v = \frac{V}{E} \quad (3)$$

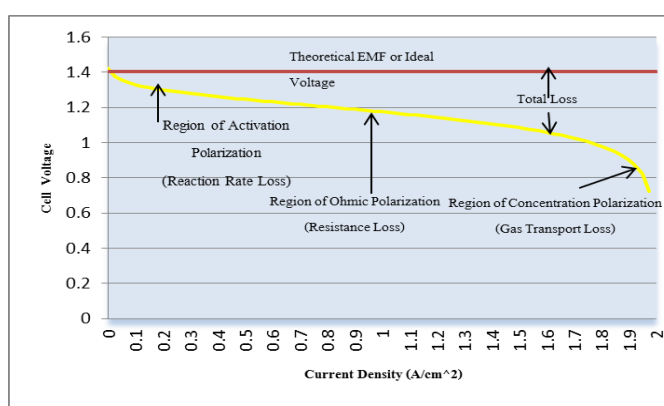
η_v คือประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า,

V คือความค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จริง

E คือความค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี ($E = 0.86$ โวลต์)

การวิเคราะห์สมรรถนะของรีดออกซิฟอล์วแบตเตอรี่

การทำงานของรีดออกซิฟอล์วแบตเตอรี่ จะมีการวัดค่าออกมาอยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสคือปริมาณกระแสที่ได้ต่อหน่วยพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาภายในรีดออกซิฟอล์วแบตเตอรี่ ในหน่วย milli amperes per square centimeter (mA/cm^2) จากการทำงานของรีดออกซิฟอล์วแบตเตอรี่ สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานได้ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส (I-V Characteristic Curve) ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Linden & Reddy, 2002)



ภาพที่ 3 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแส

จากภาพที่ 3 แสดงความต่างศักย์ที่เซลล์ให้ออกมาจะลดลงเมื่อมีกระแสไหลมากขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสควรจะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนอน แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทำงานของรีดออกซิฟอล์วแบตเตอรี่ ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุสำคัญ ดังนี้ คือ

ความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ออกมาขณะอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ๆ ไม่เพียงพอ เรียกว่า reaction rate loss

ความต้านทานของ proton exchange membrane ทำให้ความสามารถในนำโปรตอนต่ำลง เรียกว่า resistance loss

ความต้านทานของชั้นการแพร่และตัวสะสมกระแส ทำให้ความสามารถในการนำอิเล็กตรอนต่ำลง เรียกว่า resistance loss

ผลเนื่องจากอัตราการแพร่ในกรณีที่สาร BQDS ผ่านชั้นการแพร่ไปสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาขณะเดียวกันกับ BQDSH₂ กำลังไหลสวนทางออกมาทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง เรียกว่า gas transport loss

รีดออกซิฟอล์วแบตเตอรี่ ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนได้ถูกพัฒนาขึ้น ภายใต้สมการกฏอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์มวล และสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก

รีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่นั้นเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดังแสดงไว้ในภาพที่ 1 และจากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสามารถนำมาแสดงดังสมการที่ 4 – 7

$$V = E_{thermo} - \Delta E_{act} - \Delta E_{ohmic} - \Delta E_{conc} \quad (4)$$

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงของรีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่

E_{thermo} คือ แรงดันไฟฟ้าทางเทอร์โมไดนามิกส์ของรีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่

ΔE_{act} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดการสูญเสียเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมี

ΔE_{ohmic} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดการสูญเสียเนื่องจากการนำไฟฟ้าของวัสดุ

ΔE_{conc} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดการสูญเสียเนื่องจากการไหลของสารทำงาน

ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการสูญเสียสามารถหาได้จากสมการที่ดังนี้

$$E_{thermo} = E_{thermo}^0 - \left[\left(\frac{RT}{n_e F} \right) \ln \left(\frac{P_{HCl}}{P_{H_2} \times \sqrt{P_{Cl_2}}} \right) \right] \quad (5)$$

$$\Delta E_{act} = - \left(\frac{RT}{\alpha n_e F} \right) \ln(i_o) + \left(\frac{RT}{\alpha n_e F} \right) \ln(i) \quad (6)$$

$$\Delta E_{ohmic} = i(ASR_{ohmic}) \quad \Delta E_{conc} = \left(\frac{RT}{n_e F} \right) \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (7)$$

E_{thermo}^0	คือ	แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์มีค่าเท่ากับ 0.86 V
R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.3144 J/mol K)
T	คือ	อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเคลวิน K
n_e	คือ	จำนวนของอิเล็กตรอนต่อการทำปฏิกิริยาไอออนหรือโมเลกุล
F	คือ	ค่าคงที่ของ Faraday (96,500 C/mol)
P_{H_2BQDS}	คือ	ความดันย่อยของ BQDSH ₂
P_{AQS}	คือ	ความดันย่อยของ AQS
P_{BQDS}	คือ	ความดันย่อยของ BQDS

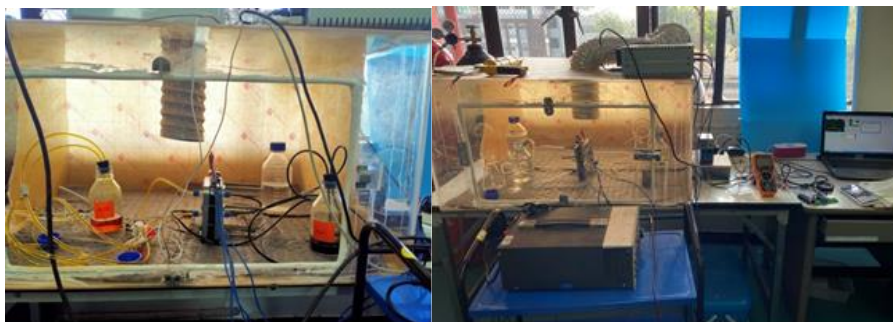
4. วิธีดำเนินการวิจัย

ต้นแบบรีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่ โดยใช้ AQS และ BQDS เป็นสารตั้งต้น ในบทความนี้แสดงในรูปที่ 1 - 2 endplates ทำจากแผ่น อะลูมิเนียม ตัวเก็บกระแส ทำจากทองเหลือง ช่องการไหล ทำจากกราฟไฟต์ที่มีพื้นที่ทำปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร และแผ่นเมมเบรนใช้ Nafion® 117

เคลือบบน GDL (gas diffusion electrode) ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกสเปรย์ ส่วนของ Pt /C 20% โหลดตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของ Pt ผสม Nafion 210 ไมโครลิตร ที่ด้านแอโนดและแคโทดเคลือบบนเมมเบรนด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกสเปรย์ endplates มีขนาด 11 cm x 11 cm พร้อมช่องไหล 2 แบบ คือ serpentine channel (ความกว้างของช่อง x ความลึก = 2 cm. X 2 cm. ระยะห่างระหว่างช่อง = 0.4 mm) และ Parallel channel (ความกว้างของช่อง x ความลึก = 2 cm X 2 cm. ระยะห่างระหว่างช่อง = 0.4 mm) ใช้เมมเบรน Nafion® 117 (หนา 0.178 mm.) และใช้ปะเก็นแบบ poly-tetrafluoroethylene (PTFE) เพื่อปิดผนึกการประกอบเซลล์ขนาดเกลียวแปดตัว (3/8 นิ้ว) แรงบิดในการขันน็อต 60 lbf·in เมื่อการประกอบเซลล์เสร็จสมบูรณ์ ทำการต่อท่อ PTFE ถูกใช้เพื่อส่งสารตั้งต้นเข้าและออกจากเซลล์ (Thomassen et al., n.d.)

การทดลองในการหาศักยภาพและประสิทธิภาพของรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ จำเป็นต้องมีการควบคุมตัวแปรต้น และตัวแปรควบคุมให้คงที่ เพื่อให้ได้ตัวแปรตามหรือผลการทดลองที่ถูกต้อง โดยการออกแบบชุดทดสอบจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งชุดทดสอบจะมีส่วนประกอบอันได้แก่ เครื่องวิเคราะห์แบตเตอรี่ (Battery Analyzer) รุ่น LaMantia® BA405 Battery Analyzer ใช้ในการประจุกระแสไฟฟ้า ในการคายประจุของแบตเตอรี่จะใช้เครื่อง TDI Transistor Devices® RBL 488 100-60-400 เป็นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์โหลด (Electronic load) บั๊มที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบ Diaphragm pump สามารถควบคุมตัวแปรควบคุมซึ่งคืออัตราการไหล ที่เข้าสู่เซลล์ให้มีปริมาตรคงที่ 0 - 500 มิลลิตรต่อนาที

งานวิจัยนี้ จะเป็นการหาศักยภาพของชุดต้นแบบรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ ซึ่งศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลง Stage of Charge และ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยการทดลองนี้จะมีการเปรียบเทียบช่องการไหลของสารตั้งต้นสองแบบ อัตราการไหลของสารละลายที่ 300 – 500 ml/min เป็นตัวแปรต้น และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่เป็นตัวแปรตาม นอกจากนี้การทดลองจะมีตัวแปรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิของสารละลายจะกำหนดอยู่ที่ 25 °C ความเข้มข้นสารละลาย AQS และ BQDS จะกำหนดอยู่ที่ 0.2 M และอัตราการไหลของสารละลายจะกำหนดอยู่ที่ 100 ml ระบบทดสอบประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่เหมาะสมของถัง ให้ความชื้นด้านแคโทด ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่จำเป็น สำหรับการควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อการทำงาน เช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น ความดัน อัตราการไหลและกระแสไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 4 – 7 ซึ่งผลการทดลองและข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์สมรรถภาพเซลล์รีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่



ภาพที่ 4 ชุดทดสอบสมรรถนะการทำงานของรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่



ภาพที่ 5 เทคนิคอัลตราโซนิกสเปรย์ ของ Pt/C 20% โหลดตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรน

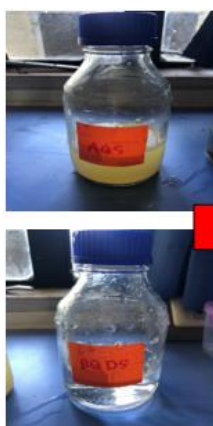


(ก)

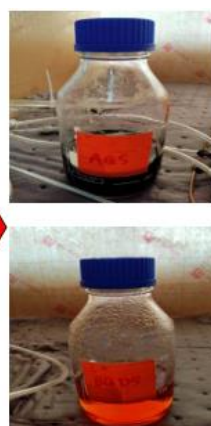


(ข)

ภาพที่ 6 (ก) ช่องการไหลของสารแบบ Parallel Channel (ข) ช่องการไหลของสารแบบ Serpentine channel



(ก)



(ข)

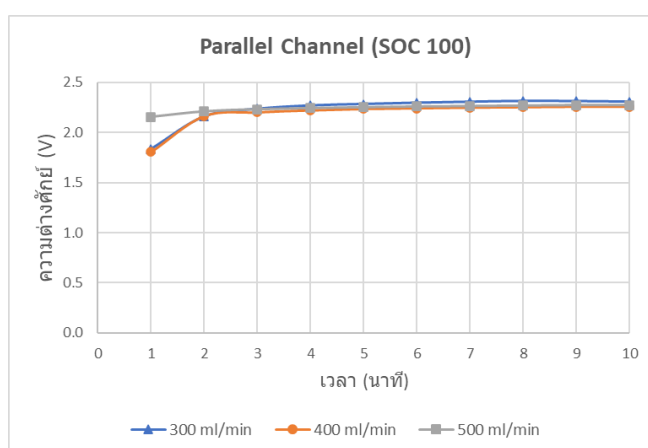
ภาพที่ 7 (ก) แสดงสาร AQS และสาร BQDS ก่อนทำการประจุไฟฟ้า (ข) แสดงสาร AQS และสาร BQDS หลังทำการประจุไฟฟ้า

จากภาพที่ 7 ก่อนการทดสอบอัตราการอัดและคายประจุไฟฟ้า พบว่า สีของสาร AQS เป็นสีเหลืองขุ่น และ BQDS เป็นสีขาวใส และเมื่อทดสอบการอัดและคายประจุเข้าไปสารทั้ง 2 เริ่มเปลี่ยนสีขึ้น โดยสาร AQS จะเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีเขียวเข้ม ส่วนสาร BQDS จะเริ่มกลายเป็นสีแดงเข้มจนกลายเป็นสีแดงจางลง

5. ผลการวิจัย

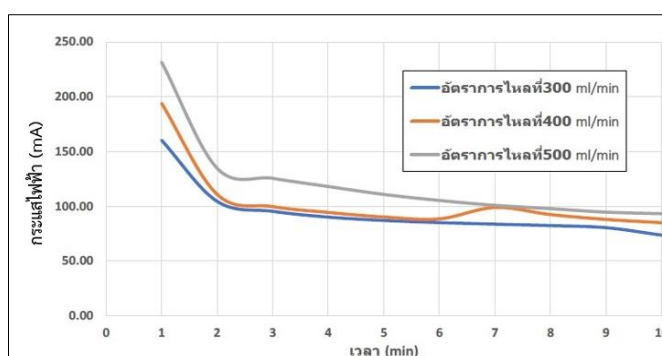
งานวิจัยนี้ศึกษาการทำงานของรีด็อกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ โดยใช้สารออกแกนิคเป็นสารตั้งต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาช่องการไหลและอัตราการไหลของสารตั้งต้น ที่ส่งผลต่อการทำงานของรีด็อกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่ มีผลวิจัยดังนี้

ผลของการอัดประจุไฟฟ้าที่ 1 A ที่ SOC 100% ที่ช่องการไหลแบบ Parallel Channel และอัตราการไหลต่าง ๆ



ภาพที่ 8 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ SOC 100%

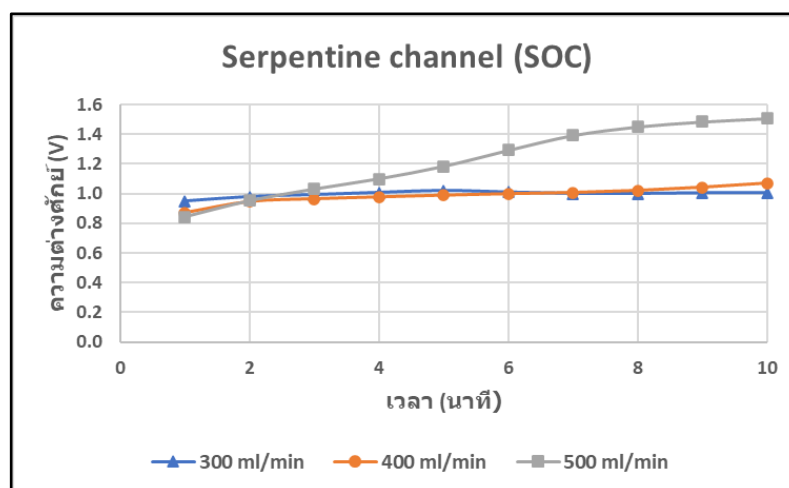
จากภาพที่ 8 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ SOC 100% พบว่าอัตราการไหลที่ 300 ml/min มีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าอัตราการไหลที่ 400 และ 500 ml/min อยู่ที่ 2.31V



ภาพที่ 9 กราฟการเปรียบเทียบอัตราการไหล 300 400 และ 500 ml/min ที่ SOC 100%

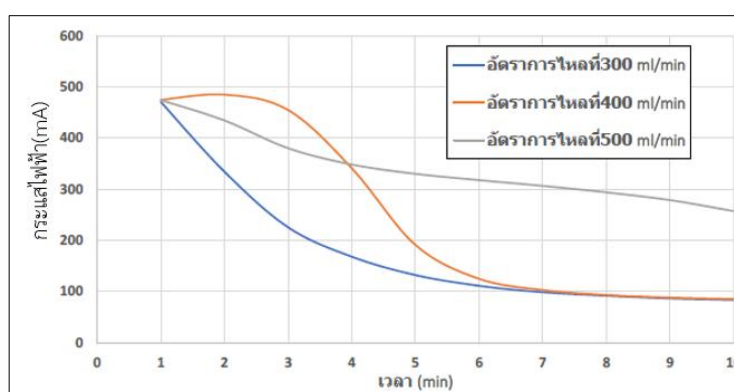
จากภาพที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ SOC 100% พบว่าที่อัตราการไหล 500 ml/min มีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 231.36 mA

ผลของการอัดประจุไฟฟ้าที่ 1 A ที่ SOC 100% ที่ช่องการไหลแบบ Serpentine channel และอัตราการไหลต่าง ๆ



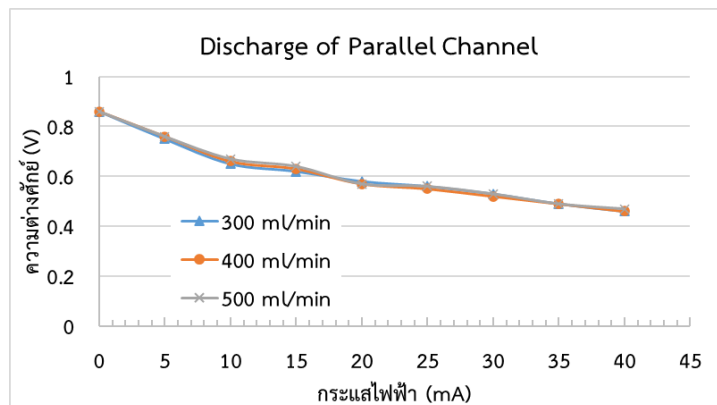
ภาพที่ 10 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหล ที่ SOC 100%

จากภาพที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ SOC 100% พบว่าที่อัตราการไหล ที่ 500 ml/min มีแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 1.59V

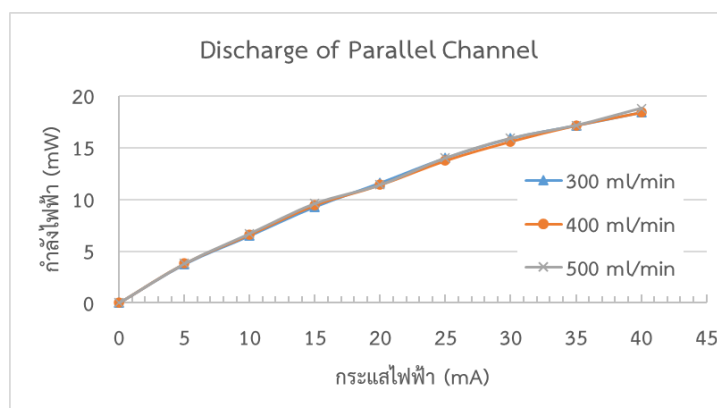


ภาพที่ 11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ 300 400 และ 500 ml/min ที่ soc 100%

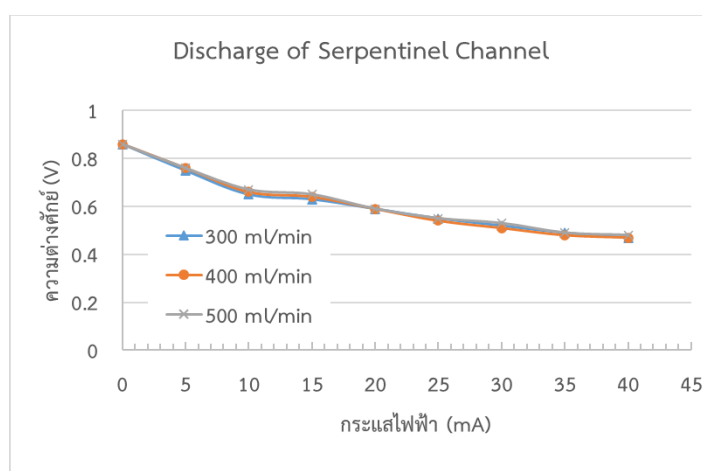
จากภาพที่ 11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ 300 400 และ 500 ml/min ที่ soc 100% พบว่าที่อัตราการไหลที่ 400 ml/min มีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 484.75 mA



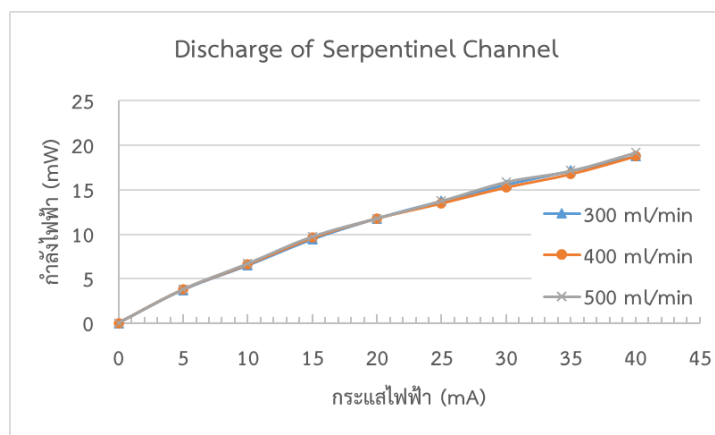
ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหล 300, 400, 500 mL/min ช่องการไหลแบบ Parallel Channel



ภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหล 300, 400, 500 mL/min ช่องการไหลแบบ Parallel Channel



ภาพที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหล 300, 400, 500 mL/min ช่องการไหลแบบ Serpentine Channel



ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่อัตราการไหล 300, 400, 500 ml/min ช่องการไหลแบบ Serpentine Channel

จากภาพที่ 12 - 15 แสดงถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าที่ช่องการไหลแบบ Serpentine Channel ที่อัตราการไหล 500 ml/min จะมีสมรรถนะของเซลล์รีดออกซิเจนแบบเตอรี ดีที่สุด เพราะว่ามีค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าสูงสุดในการทำงานของรีดออกซิเจนแบบเตอรี

ช่องการไหลแบบ	Parallel Channel	Serpentine Channel
อัตราการไหล ml/min	500	500
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (mW)	18.8	19.2
ความต่างศักย์ไฟฟ้า(V)	0.47	0.48
กระแส (mA)	40	40
ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า	54.65%	55.81%

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของช่องการไหลแบบ Parallel Channel ที่ SOC 100% พบว่าอัตราการไหลที่ 300 ml/min มีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าอัตราการไหลที่ 400 และ 500 ml/min อยู่ที่ 2.31V และที่อัตราการไหล 500 ml/min มีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 231.36 mA ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของช่องการไหลแบบ Serpentine Channel ที่ Stage of Charge (SOC) ที่ร้อยละ 100 พบว่า อัตราการไหลที่ 500 ml/min มีแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 1.59V และที่อัตราการไหลที่ 400 ml/min มีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 484.75 mA

ผลของการทดสอบพบว่าที่ช่องการไหลแบบ Serpentine Channel ที่อัตราการไหล 500 จะมีสมรรถนะของเซลล์รีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่ดีที่สุด เพราะว่ามีค่ากำลังไฟฟ้าได้จะมีสมรรถนะการทำงานของเซลล์รีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่ดีที่สุด มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 19.2 mW และกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.04 แอมแปร์ ที่ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 55.81

ช่องการไหลแบบ Serpentine Channel เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเซลล์รีดอกซ์โพลาร์แบตเตอรี่. ใช้สารอินทรีย์ เนื่องจากความดันภายในเซลล์มากกว่า ช่องการไหลแบบ Parallel Channel ส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าที่ดีกว่า อัตราการไหลที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าที่สูง ขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่ายสารตั้งต้น แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีอัตราการไหลที่มากเกินไปก็จะส่งผลให้เกิดความต้านทานของเซลล์ที่เพิ่มมากขึ้นเรียกว่า gas transport loss

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่ให้เงินสนับสนุนในงานวิจัยนี้จนเป็นผลสำเร็จ

8. เอกสารอ้างอิง

- Anurak, K., Uthaichana, K., Punyawudho, K., Khunatorn. Y. (2017). *The Performance and Efficiency of Organic Electrolyte Redox Flow Battery Prototype*. 2nd International Conference on Advances on Clean Energy Research, ICACER 2017, 7-9 April 2017 Berlin, Germany.
- Carvela, M., Raschitor, A., Rodrigo, M. A., & Lobato, J. (2020). Recent Progress in Catalysts for Hydrogen-Chlorine Regenerative Fuel Cells. *Catalysts*, 10(11), 1263. <https://doi.org/10.3390/catal10111263>.
- Huskinson, B., Rugolo, J., Mondal, S. K., & Aziz, M. J. (2012). *A High Power Density, High Efficiency Hydrogen-Chlorine Regenerative Fuel Cell with a Low Precious Metal Content Catalyst*. ArXiv:1206.2883 [Cond-Mat]. <http://arxiv.org/abs/1206.2883>.
- Thomassen, M., Børresen, B., Hagen G. and Tunold, R. (2003). H₂/Cl₂ fuel cell for co-generation of electricity and HCl. *J Appl Electrochem*, vol. 33, pp. 9–13.
- Thomassen, M., Børresen, B., Hagen G. and Tunold, R. (n.d.). *H₂/Cl₂ fuel cell for co-generation of electricity and HCl*. pp.5.
- Thomya, A., & Khunatorn, Y. (2020). *Analyzing Discharge Characteristics of Redox Flow Battery using Hydrochloric Acid as a Reaactant*. 2020 International

Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change (ICUE), 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICUE49301.2020.9306982>.

Linden, D., & Reddy, T. B. (Eds.). (2002). *Handbook of batteries (3rd ed)*. McGraw-Hill.