

การผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบผันกลับ

เกียรติศักดิ์ คมวัชระ¹⁾ ประสงค์ วงศ์วิชา²⁾ และ กันยรัตน์ โหละสุต^{*3)}

บทคัดย่อ

การผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบผันกลับเป็นทางเลือกหนึ่งของพลังงานที่ทำได้ บทความนี้กล่าวถึงหลักการของ อิเล็กโทรไลซิสแบบผกผันและผลจากการทดลองเกี่ยวกับการลดความต้านทานภายในเพื่อที่จะลดการสูญเสียของศักย์ไฟฟ้าพร้อมกับปรับปรุงแนวคิดการนำเอาพลังงานสะอาดมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการทดลองเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้ว ค่ากำลังสูงสุดที่ได้รับเพิ่มจาก 16.59 ไมโครวัตต์ เป็น 116.29 ไมโครวัตต์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความต้านทานภายในของเซลล์ลดลงจาก 1,213.48 โอห์ม เป็น 80.89 โอห์ม โดยหลักการเป็นไปได้ที่จะใช้ อิเล็กโทรไลซิสแบบผันกลับมาผลิตไฟฟ้าโดยใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำเกลือตรงจุดที่แม่น้ำมาพบกับน้ำทะเล อย่างไรก็ตามกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบผันกลับยังคงต้องศึกษาและพัฒนาอีกต่อไป ก่อนที่จะนำไปใช้ได้จริงแพร่หลายในอนาคต ในขณะที่ปัญหาเรื่องต้นทุนและการคุ้มทุนยังเป็นอุปสรรคใหญ่ที่จะต้องปรับปรุงแก้ไข

คำสำคัญ: อิเล็กโทรไลซิสแบบผันกลับ การผลิตไฟฟ้า น้ำเค็ม น้ำเกลือ น้ำในแม่น้ำ ความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำเกลือ

¹⁾ รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม. 10520
อีเมลล์ kkiatti@kmitl.ac.th

²⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002
อีเมลล์ prasong@kku.ac.th

^{*3)} รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002
อีเมลล์ kanyarat@kku.ac.th

*corresponding author

Electricity generation by reverse electrodialysis

Kiattisak Kumwachara¹⁾ Prasong Wonvicha²⁾ and Kanyarat Holasut^{*3)}

Abstract

Electricity generation by Reverse Electrodialysis (RED) process is one of the alternative energy available. In this paper the concept of RED is introduced together with the experimental results concerning the reduction of the internal resistance of the RED cell in order to minimize the voltage potential loss and improve the prospect of using clean and energy-efficient utilization. By increasing the surface area of electrodes the maximum power obtained increased from 16.59 micro watt to 116.29 micro watt, while the internal resistance of the RED cell reduced from 1,213.48 ohm to 80.89 ohm. In principle it is possible to use the RED to generate electricity by using potential of salinity gradient at the point where the river meets the sea. However the RED still needed more development and study before widely adopted while the investment cost and break even point remained the main obstacles which need to be overcome.

Keywords : reverse electrodialysis, electricity generation, salt water, sea water, river water, salinity gradient

¹⁾ Associate Professor, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, E-mail: kkiatti@kmitl.ac.th

²⁾ Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, E-mail: prasong@kku.ac.th

^{*3)} Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, E-mail: kanyarat@kku.ac.th

*corresponding author

1. บทนำ

การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ที่ได้จากก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดิบ หรือ ถ่านหิน ของมนุษย์โดยเฉพาะในช่วงร้อยปีที่ผ่านมา ยังคงสูงมาก ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในรูปของฝนกรด ภาวะโลกร้อนและอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคตอันใกล้นี้ ผลกระทบในทิศทางที่เลวร้ายนี้ทำให้เกิดความกดดันทั้งด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและทางเศรษฐศาสตร์ในการที่จะแสวงหาวิธีการนำพลังงานสะอาดซึ่งมีอยู่อย่างเหลือเฟือ และมีตลอดเวลามาประยุกต์ใช้ ในปัจจุบันมีการค้นคว้า และวิจัยเพื่อนำเอาพลังงานเหล่านี้ที่มีอยู่หลากหลายรูปแบบ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ หรือพลังงานแสงแดด มาเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่สะดวกแก่การใช้ การนำพลังงานรูปแบบต่าง ๆ มาใช้จะขึ้นกับความเหมาะสมของแต่ละภูมิภาค เป็นพลังงานที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดแทนพลังงานฟอสซิลซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้กันอยู่มาก แต่อย่างไรก็ตามคนส่วนใหญ่มีความคิดว่าการนำพลังงานทางเลือกมาใช้ยังมีต้นทุนสูงและราคาแพง ดังนั้นพลังงานทางเลือกที่ดีนั้นหากนำมาใช้ควรมีคุณสมบัติพอสรุปได้เป็น 5 อย่างดังนี้

1. ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรือถ้าหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็ควรมีผลกระทบน้อยที่สุด
2. ต้องเป็นพลังงานที่มีให้ใช้ได้ตลอดเวลา
3. เป็นพลังงานที่มีมาก และพอเพียงสำหรับความต้องการของประชากร
4. มีคุณสมบัติที่สัดส่วนของการให้พลังงานออกมาที่มนุษย์สามารถนำไปใช้งานได้ ต่อพลังงานที่ต้องลงทุนลงไปจะต้องสูง คือพลังงานที่ได้ต้องมากกว่าพลังที่ใส่เข้าไปหลายเท่า
5. ต้องเป็นระบบที่ต้นทุนไม่สูงเกินไป

ถ้าใช้เงื่อนไขทั้ง 5 ข้อในการพิจารณาคัดเลือก พลังงานทางเลือก จะพบว่าพลังงานที่ได้จากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือระหว่างน้ำจืดกับน้ำทะเล หรือ Salinity Gradient

Energy (SGE) จะผ่านเงื่อนไข 4 ข้อ คือ ข้อ 1 ถึงข้อ 4 แต่ยังไม่ผ่านเงื่อนไขข้อที่ 5

ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้พื้นฐานของความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มในการผลิตไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธี เช่น

1. Cryoscopic คือการใช้ความแตกต่างของจุดเยือกแข็งและความแตกต่างของปริมาณระหว่างน้ำกับน้ำแข็งและน้ำเค็มกับน้ำเค็มที่แข็งตัวในการสร้างความดัน เพื่อนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า (Knjaev, 2001)
2. ใช้ความแตกต่างของความดันออสโมติกของน้ำจืดและน้ำเค็ม (Salinity-gradient vapor-pressure power conversion) เพื่อไปหมุนกังหันและผลิตไฟฟ้า (Olsson et al., 1979)
3. Pressure retarded osmosis (RPO) ซึ่งใช้หลักการของความแตกต่างความดันออสโมติก (Osmotic pressure) ของของเหลว ซึ่งอยู่คนละด้านของแผ่นเยื่อ ความดันนี้จะทำให้น้ำจืดไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านไปยังด้านน้ำเค็ม เกิดผลทำให้ระดับน้ำด้านน้ำเค็มสูงขึ้นพอที่จะนำไปขับเคลื่อนน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าได้ (Loeb, 1975 and Loeb, 1976)
4. Reverse Electrodialysis (RED) เป็นระบบที่ใช้แผ่นเยื่อเลือกผ่านสองชนิด โดยใช้หลักการที่ว่าประจุของเกลือจะไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านประจุ (Ion exchange membrane) จากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปยังด้านที่มีความเข้มข้นต่ำ การเคลื่อนย้ายของประจุผ่านแผ่นเยื่อก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า (Pattle, 1954; Pattle, 1955; Weinstein and Leitz, 1976; Audinos,

1992; Jagur-Grodzinski and Kramer, 1986; Tuek and Bandura, 2007; Suda et al., 2007)

พบว่าสองวิธีหลัก คือวิธี PRO และ RED เป็นวิธีที่มีการพัฒนามาเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสองวิธีแรก อย่างไรก็ตามทั้ง PRO และ RED มีวิธีการที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดดังนี้

1. ใน PRO 99% ของมวลของน้ำจืดจะต้องไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านไปผสมกับน้ำเค็ม แต่ใน RED มวลเพียง 1% ของน้ำเกลือซึ่งอยู่ในรูปของประจุจะไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านไปผสมกับน้ำจืด
2. ใน PRO การผลิตไฟฟ้าต้องอาศัยกังหันน้ำ (Water turbine) แต่ RED จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยตรง
3. PRO ใช้เยื่อเลือกผ่านชนิดเดียว แต่ RED ใช้เยื่อเลือกผ่าน 2 ชนิด

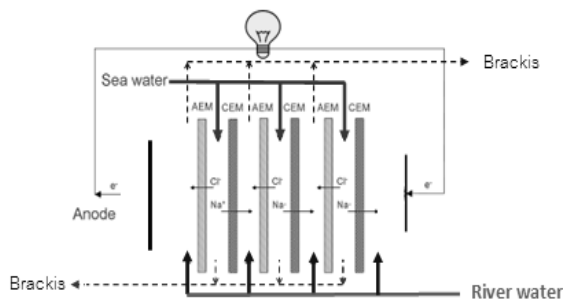
จุดเด่นของการผลิตไฟฟ้าที่ใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มก็คือระบบนี้สามารถทำงานได้ตลอดเวลา แตกต่างจากระบบที่ใช้พลังงานแสงแดดหรือพลังงานลม ซึ่งจะมาเป็นช่วง ๆ การใช้พลังงานที่มีธรรมชาติให้การผลิตเป็นช่วง ๆ ให้มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นจะต้องมีการเก็บกักพลังงานเพื่อที่จะสามารถนำพลังงานที่เก็บไว้ไปใช้ได้ในช่วงเวลาที่ไม่มีการผลิต ซึ่งในปัจจุบันพบว่าเทคโนโลยีที่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าให้ได้มาก ๆ และใช้ได้นาน ๆ ในราคาที่ไม่น่าสูงนั้นยังไม่มี นอกจากนี้ความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและตลอดเวลายังช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบสายส่ง (Grid system) ให้ดีขึ้นอีกด้วย ทำให้ระบบการผลิตไฟฟ้าสะอาดที่ไม่จำเป็นจะต้องใช้ระบบการกักเก็บควบคู่ไปด้วยกันนั้นเป็นเรื่องที่มีคุณค่าควรแก่การศึกษาเป็นอย่างมาก

เนื่องจาก RED สามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยตรงจึงมีความซับซ้อนน้อยกว่า PRO ซึ่งจำเป็นจะต้องมีกังหันน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในขณะเดียวกัน RED ยังเหมาะสมกว่าแม้ในกรณีที่น้ำเค็มมีความเข้มข้นของเกลือไม่สูง ซึ่งหมายความว่า RED สามารถใช้กับน้ำทะเลทั่ว ๆ ไปได้ แต่สำหรับ PRO แล้วความเข้มข้นของน้ำเค็มต้องสูงเพื่อที่จะสร้างความแตกต่างของระดับน้ำให้สูงพอที่จะปั่นกังหันน้ำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าการที่ RED เป็นระบบที่มีความซับซ้อนต่ำ ทำให้สามารถทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการได้ง่าย งานวิจัย RED ส่วนมากมักจะเน้นไปที่ เยื่อเลือกผ่าน (Ion exchange membrane) (Dlugolecki et al., 2008) เนื่องจากเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ต้นทุนของระบบ RED ลดลง นอกจากนี้การลดความต้านทานภายในจะช่วยให้กำลังไฟฟ้าของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าก็เป็นการลดต้นทุนอีกทางหนึ่ง การลดความต้านทานภายในนั้นทำได้หลายวิธี วิธีที่ง่ายที่สุดก็คือการลดระยะห่างระหว่างเยื่อเลือกผ่านซึ่งจะทำให้ประจุไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านได้สะดวกที่สุด แต่วิธีที่น่าสนใจที่ใช้กันมากเพื่อลดความต้านทานภายในในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบหมุนเวียน (Regenerative fuel cell) ก็คือการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วเพื่อให้ถ่ายต่อการถ่ายเทประจุบริเวณขั้ว (Vilar et al., 1998; and Belgis and Schafer, 2001)

2. หลักการของ Reverse Electrodialysis (RED)

RED เป็นระบบที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากการผสมของของเหลวที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน ให้กลายเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง หลักการของ RED ได้ถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย Pattle (Pattle, 1954) ในปี ค.ศ. 1959 ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานของการผสมระหว่างน้ำจืดหรือน้ำในแม่น้ำ กับน้ำเค็มหรือน้ำในทะเลซึ่งทั้งสองมีอยู่แล้วตามธรรมชาติ ให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงโดยไม่มีผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมใดๆ นั้น จึงเป็นเรื่องที่สำคัญมากสำหรับอนาคต



รูปที่ 1 ผังการทำงานของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบผันกลับ (Reverse Electrodialysis) ของการไหลแบบขนาน

ในระบบ RED น้ำจืดและน้ำเค็มจะไหลแยกกันอยู่ในแต่ละห้องโดยมีแผงของเยื่อเลือกผ่านเป็นตัวกั้น โดยที่ระบบ RED จะใช้แผ่นเยื่อเลือกผ่าน 2 ชนิด โดยชนิดแรกเป็นเยื่อเลือกผ่านที่ยอมให้ประจุบวกไหลผ่าน (Cation Exchanged Membrane, CEM) อีกชนิดหนึ่งเป็นเยื่อเลือกผ่านที่ยอมให้ประจุลบไหลผ่าน (Anion exchange membrane, AEM) กันสลับไปเป็นคู่ ๆ ไปดังรูปที่ 1 น้ำจืดและน้ำเค็มจะอยู่ภายในแต่ละห้องสลับกันไป ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมี (Chemical Potential Difference) จะเป็นแรงผลักดันให้ประจุไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านจากห้องน้ำเค็มไปน้ำจืด ในกรณีที่น้ำเค็มเป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประจุ Na^+ จะไหลผ่าน CEM ไปยังขั้วบวก และในขณะเดียวกันประจุ Cl^- ก็ จะไหลผ่าน AEM ไปยังขั้วลบ ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือจะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ถ้ามีการต่อขั้วทั้งสองเข้าด้วยกันโดยผ่านตัวต้านทานภายนอก ค่าความต่างศักย์ระหว่างเยื่อเลือกผ่านของระบบ RED สามารถประมาณได้โดยใช้สมการเนิสต์ (Nernst's Equation) ดังนี้

$$V_{OCV} = \frac{kRT}{ZF} \ln \left(\frac{a_c}{a_d} \right) \quad \dots (1)$$

โดยที่ V_{OCV} = Open Circuit Voltage (OCV; Volt)

k = Perm selectivity of membrane
(Volt.coulomb/J)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส 8.314 J/mol-K

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

Z = Electrochemical valence = 1 ในกรณีนี้

F = Faraday constant 96,485 coulomb/mol

a_c / a_d = ความเข้มข้นของเกลือในน้ำเค็มต่อความเข้มข้นของเกลือในน้ำจืด (-)

เนื่องจากระบบ RED ใช้เยื่อเลือกผ่าน CEM และ AEM สลับกันเป็นคู่ ๆ เพราะฉะนั้น V_{OCV} ของระบบจะเท่ากับ

$$V_{OCV} = \frac{N(k_c + k_d)RT}{F} \ln \left(\frac{a_c}{a_d} \right) \quad \dots (2)$$

ในกรณีที่ $Z = 1$ และ k เป็นผลรวมของ k_c และ k_d หรือ Perm selectivity of membrane ของ CEM และ AEM ตามลำดับ ส่วน N คือจำนวนคู่ของ CEM และ AEM ในระบบ

ถ้ามีการต่อโหลดไฟฟ้ากับขั้วทั้งสองของระบบ RED แล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านโหลดและความต่างศักย์จะหาได้จากสมการ

$$V = V_{OCV} - Ir \quad \dots (3)$$

$$V = IR \quad \dots (4)$$

โดยที่ V = ความต่างศักย์

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด

R = ความต้านทานภายในของระบบ RED

r = ความต้านทานภายนอก หรือโหลดที่ใส่เข้าไป

r = ความต้านทานภายใน

จากสมการ (3) และ (4) สามารถหาความต้านทานภายใน (r) ด้วยสมการ

$$r = (V_{OCV} - V) \frac{R}{V} \quad \dots (5)$$

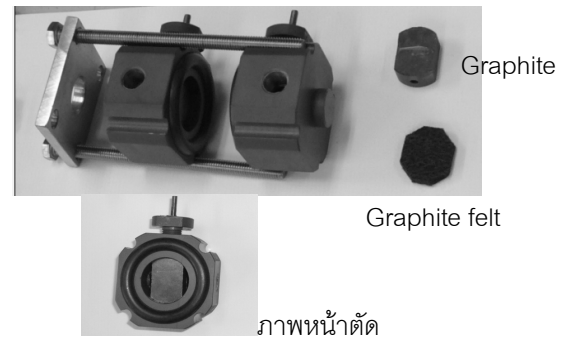
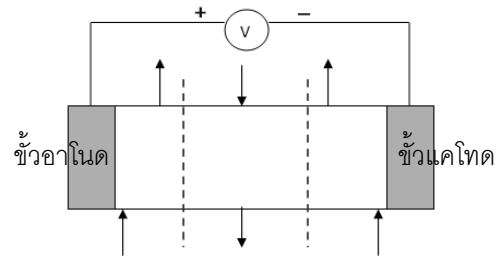
และกำลังไฟฟ้า P จากสมการ

$$P = IV = \frac{V^2}{R} \quad \dots (6)$$

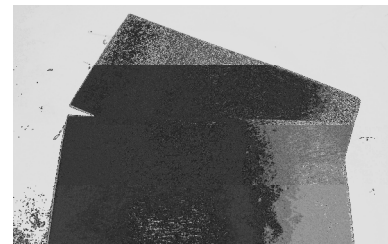
จากสมการ (3) และ สมการ (6) จะเห็นว่าถ้าเราสามารถลดค่าความต้านทานภายใน ผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียน้อยลงและกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

3. การทดลอง

ระบบ RED Cell ที่ใช้ในการทดลอง เป็นระบบเซลล์เดี่ยวที่ CEM และ AEM มี 1 คู่ รูปที่ 2 แสดงถึงรายละเอียดของชิ้นส่วนหลัก ๆ ของ RED ในเซลล์ประกอบด้วยห้องทั้งหมด 3 ห้อง ห้องด้านข้างทั้งสองห้องมีแท่งแกรไฟท์ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เซลเลนเนียม (ประเทศไทย) จำกัด ทำหน้าที่เป็นขั้วบรรจุอยู่ สำหรับการทดลองที่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้ว แผ่นแกรไฟท์เฟลท์ (graphite felt) รูปที่ 3 หน้า 4 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูป 8 เหลี่ยมจะถูกอัดเข้าไประหว่างเยื่อเลือกผ่านและขั้วแกรไฟท์ ส่วนห้องกลางเป็นห้องทรงกระบอกปริมาตร 9.05 ลูกบาศก์เซนติเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร) มีทางเข้าและทางออกของสารละลาย ผนังด้านหนึ่งของห้องกลางมีเยื่อเลือกผ่าน CEM (ชนิด Nafion 117) เป็นผนัง และอีกด้านหนึ่งมีเยื่อเลือกผ่าน AEM (ชนิด APS-NDS) เป็นผนัง ทั้งเยื่อเลือกผ่าน CEM และ AEM มีพื้นที่ใช้งาน 4.5 ตารางเซนติเมตร และติดตั้งให้มีช่องห่างระหว่างเยื่อเลือกผ่าน 2 เซนติเมตร ในการทดลองน้ำเค็มที่เตรียมไว้จะถูกปั๊มเข้าไปในห้องกลางโดยเพอร์ิสเตติกปั๊มด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมง ขณะเดียวกันน้ำจืดจะถูกปั๊มขนานสองห้องข้าง ๆ พร้อมๆ กันด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมง เช่นเดียวกัน โดยความจุของน้ำเค็มในห้องกลางเท่ากับความจุของน้ำจืดในห้องข้าง ๆ สองห้องรวมกันคือ 9.05 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจึงวัดค่าทางไฟฟ้า (Electrochemical characterization measurement) เพื่อหาความสัมพันธ์รูปแบบของโพลาริเซชันกราฟ (Polarization graph หรือ I-V graph ซึ่งจะเป็นการพล็อตระหว่าง ความต่างศักย์ และ กระแสไฟฟ้า) ในระหว่างการทดลองไม่มีการควบคุมอุณหภูมิของทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม แต่จะมีการบันทึกอุณหภูมิของน้ำทั้งสองทั้งก่อนเข้าและออกจาก RED Cell ตลอดการทดลอง



รูปที่ 2 ภาพประกอบของการทดลอง



รูปที่ 3 แผ่นแกรไฟท์เฟลท์ (Graphite felt)

การเตรียมน้ำทะเล (น้ำเค็ม) และน้ำแม่น้ำ (น้ำจืด) (Artificial sea water and river water)

เกลือที่ใช้ในการทดลองจะเป็น โซเดียมคลอไรด์ บริสุทธิ์ จากบริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด (99.9%NaCl) ใช้ในการเตรียมน้ำแม่น้ำในอัตราส่วน 5 กรัมต่อลิตรน้ำกลั่นและสำหรับน้ำทะเลใช้อัตราส่วน 200 กรัมต่อลิตรน้ำกลั่น ความเข้มข้นที่เลือกใช้นี้จะมีความเข้มข้นสูงกว่าน้ำทะเล และน้ำแม่น้ำตามธรรมชาติถึง 5 เท่า เหตุผลที่ทำเช่นนี้เพื่อต้องการให้ค่าสัดส่วน a_c / a_d ใกล้เคียงกับค่า 50 ซึ่งเป็นสัดส่วนเฉลี่ยของน้ำจืดในแม่น้ำกับน้ำเค็มในทะเลมากที่สุด

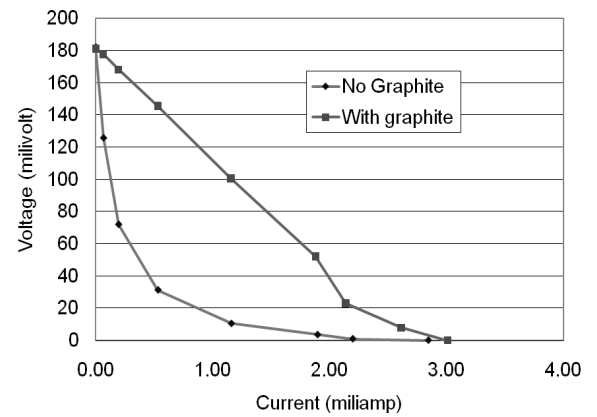
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

Open Circuit voltage (OCV)

ค่าของ Open Circuit Voltage (OCV) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในระบบ RED อุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านระบบ RED สัดส่วนของความเข้มข้นของน้ำ และ Perm selectivity ของเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ ดังแสดงไว้ในสมการที่ (2) ถ้าแทนค่าที่ใช้และวัดได้จากการทดลอง (Belgsir and Schafer, 2001) ซึ่งได้แก่ $N = 1$, $T = 299$ K, $k_c = 0.93$ สำหรับ Nafion และ $k_d = 0.89$ สำหรับ APS, และใช้ $a_c / a_d = 50$ ลงในสมการที่ (2) จะได้ค่า $OCV = 0.183$ V จากการทดลองพบว่าค่า OCV ที่วัดได้ในกรณีที่ใช้เฉพาะแท่งแกรไฟท์เป็นขั้วเท่ากับ 0.182 V ส่วนในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วโดยใช้ graphite felt ค่า OCV เท่ากับ 0.181 V ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันเลย

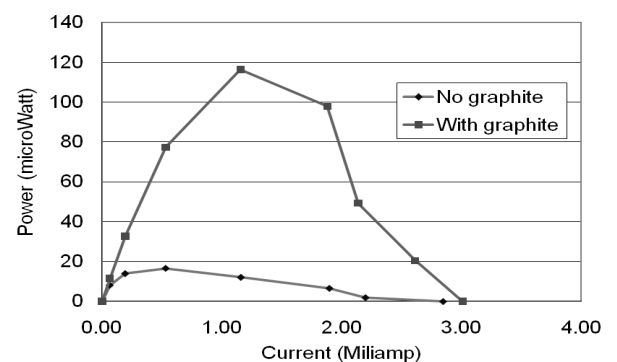
ความต้านทานภายใน

เมื่อมีการต่อความต้านทานภายนอกซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1-3160 โอห์มให้เป็น load ของระบบ RED และทำการวัดค่าความต่างศักย์ไปพร้อมกับการวัดกระแสคร่อมความต้านทานภายนอก และทำการพล็อตแบบ Polarization graph ดังแสดงในรูปที่ 4 ความชันของเส้นก็คือความต้านทานภายในของ RED Cell จะเห็นได้ว่าในกรณีที่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วความชันของกราฟเกือบจะคงที่ (กราฟเกือบเป็นเส้นตรง) และชันน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มี การเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้ว ในกรณีหลังนี้ความชันของกราฟลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานภายในที่หาโดยวิธีใช้ความชันของ Polarization graph เป็นหลัก เท่ากับ 79.67 โอห์ม และ 1,490.66 โอห์ม ในกรณีที่มีการเพิ่มและไม่เพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วตามลำดับ



รูปที่ 4 กราฟโพลาไรเซชันระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

สำหรับกำลังของระบบ RED หาได้โดยใช้สมการ (6) ดังแสดงในรูปที่ 5 กำลังสูงสุดที่หาได้จากการทดลอง เท่ากับ 116.29 ไมโครวัตต์ และ 16.59 ไมโครวัตต์ในกรณีที่ มีการเพิ่มและไม่เพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วตามลำดับ โดยทั่วไปแล้ว จุดที่ความต้านทานภายนอกเท่ากับความต้านทานภายในจะเป็นจุดที่ให้กำลังสูงสุด ถ้าใช้จุดที่ให้กำลังสูงสุด เป็นหลักแล้วหาค่าความต้านทานภายนอก ณ จุดนี้ก็จะได้ค่าของความต้านทานภายใน ถ้าใช้วิธีนี้ก็จะได้ค่าความต้านทานภายในเท่ากับ 80.89 โอห์ม และ 1,213.48 โอห์ม ในกรณีที่มีการเพิ่มและไม่เพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วตามลำดับ



รูปที่ 5 กราฟโพลาไรเซชันระหว่างกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

จะเห็นได้ว่าการหาความต้านทานภายในโดยวิธีใช้ความชันของ Polarization graph และจากหลักที่ว่าความต้านทานภายในจะเท่ากับความต้านทานภายนอกตรงจุดที่ให้กำลังสูงสุด จะให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันในกรณีที่กราฟโพราไรท์เซชันเป็นเส้นตรงหรือเกือบเป็นเส้นตรง แต่ในกรณีที่กราฟโพราไรท์เซชันเป็นเส้นโค้งและมีความชันลดลงเมื่อกระแสสูงขึ้น อย่างผลของการทดลองนี้ในกรณีที่ไม่มี การเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้ว ค่าที่ได้จากการใช้จุดที่ให้กำลังสูงสุดน่าจะมีความถูกต้องมากกว่า เพราะวิธีนี้จะให้ค่าความต้านทานภายในเพียงค่าเดียวเสมอ ไม่เหมือนกับวิธีที่ใช้ความชันของกราฟโพราไรท์เซชัน ซึ่งถ้าความชันไม่คงที่แล้ว ก็จะมีปัญหาว่าจะเลือกค่าไหน (ในกรณีที่สมการ (5) ให้ค่าต่างกัน)

ผลของการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วมีผลทำให้กำลังสูงสุดของระบบ RED เพิ่มขึ้นได้ถึง 7 เท่า และทำให้ค่าความต้านทานภายในลดลง 15 เท่า กำลังสูงสุดของระบบ RED ในการทดลองนี้เท่ากับ 116.29 ไมโครวัตต์ต่อพื้นที่ใช้งาน 4.5 ตารางเซนติเมตรของเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งให้กำลังไฟฟ้า (Power density) ของระบบ เท่า 0.258 วัตต์ต่อตารางเมตร

5. สรุป

การผลิตไฟฟ้าสะอาดโดยใช้ระบบบิโเลกโตรไลซิสแบบผันกลับ (RED) ซึ่งใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือในน้ำเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ และในทางปฏิบัติความเข้มข้นของเกลือในน้ำจะมีความแตกต่างกันตรงจุดที่แม่น้ำพบกับทะเล แต่เนื่องมาจากระบบบิโเลกโตรไลซิสแบบผันกลับ (RED) ยังมีปัญหาในเรื่องต้นทุนและจุดคุ้มทุน ซึ่งจำเป็นจะต้องปรับปรุงแก้ไข การใช้แกรไฟท์เฟลท์ (Graphite felt) ในการเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มกำลังสูงสุดของ ระบบ RED ซึ่งทำให้ต้นทุนที่ใช้ลดลงต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ในทางปฏิบัติอาจจะมียุทธวิธีที่ดีกว่าซึ่งจำเป็นจะต้องศึกษาและพัฒนาอยู่อีกมาก ก่อนที่การผลิตไฟฟ้าสะอาดโดยใช้ระบบบิโเลกโตรไลซิสแบบผันกลับ (RED) จะแพร่หลายในอนาคต

6. บรรณานุกรม

- Audinos, R. (1992). Electric power produced from two solutions of unequal salinity by reverse electrodialysis, *Ind. J. Chem.*, 31A, 348–354.
- Belgsir, E.M. and Schafer, H.J. (2001). Selective oxidation of carbohydrates on Nafion-TEMPO-modified graphite felt electrodes Electrochemistry, *Communications*, 3, 32-35.
- Dlugolecki, P., Nymeijer, K., Metz, S., and Wessling, M. (2008). Current status of ion exchange membranes for power generation from sanitary gradients. *Journal of membrane science*, 319, 214-222.
- Jagur-Grodzinski, J. and Kramer, R. (1986). Novel process for direct conversion of free energy of mixing into electric power, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 25, 443–449.
- Kniajev, V. (2001). Energy of salinity gradient—new source of energy with minimal environmental impact, in: Abstracts from the International Workshop “Result of Fundamental Research for Investments” (IWRFR’2001), St. Petersburg, Russia.
- Loeb, S. (1975). Osmotic power plants, *Science*, 189, 654–655.
- Loeb, S. (1976). Production of energy from concentrated brines by pressure retarded osmosis. 1. Preliminary technical and economic correlations, *J. Membr. Sci.* 1, 49–63.
- Olsson, M., Wick, G. L., and Isaacs, J.D. (1979). Salinity gradient power—utilizing vapor-pressure differences, *Science*, 206, 452–454.
- Pattle, R.E. (1954). Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile, *Nature*, 174, 660-660.

- Pattle, R.E. (1955). Electricity from fresh and salt water without fuel, *Chem. Proc. Eng.* 35, 351–354.
- Suda, F., Matsuo, T., and Ushioda, D. (2007). Transient changes in the power output from the concentration difference cell (dialytic battery) between seawater and river water, *Energy*, 32, 165–173.
- Turek, M. and Bandura, B. (2007). Renewable energy by reverse electrodialysis, *Desalination*, 205, 67–74.
- Veerman, J., Post, J.W., Metz, S.J., Saakes, M., and Harmsen, G.J. (2008). Reducing power losses caused by ionic shortcut currents in reverse electrodialysis stacks by a validated model, *J. Membr. Sci.*, 310, 418–430.
- Vilar, E.O., Freitas, N.L., Lirio, F.R., and Sousa, F.B.(1998). Study of the electrical conductivity of graphite felt employed as a porous electrode, *J.Chem. Eng.*, vol.15, no.3,São Paulo Sept.,108-116.
- Weinstein, J.N., and Leitz, F.B.(1976). Electric power from differences in salinity: the dialytic battery, *Science*, 191, 557–559.