

เมมเบรนโคโตนเคลือบแพลทินัมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง



นางสาวปรีดี วันแฉลေး

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Pt-PLATED CHITOSAN MEMBRANE FOR DIRECT METHANOL FUEL CELL

Miss Preeti Wanaelo



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง
	ชนิดเมทานอลโดยตรง
โดย	นางสาวปรีดี วันแอะละ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทรภา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทรภา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นवलพรณ จันทศิริ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต)

ปรีติ วันแฉะ : เมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอล โดยตรง (Pt-PLATED CHITOSAN MEMBRANE FOR DIRECT METHANOL FUEL CELL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ชันทอง สุนทรภา, 69 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าบนเมมเบรนไคโตซาน 4 ชนิด คือ แบบไม่มีการเชื่อมขวาง แบบมีการเชื่อมขวาง แบบโตะของแบบไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบโตะของแบบมีการเชื่อมขวาง พบว่า สภาวะการเคลือบที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาจากค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนในแนวภาคตัดขวาง คือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที ด้วยองค์ประกอบสารละลายเคลือบที่ทำให้เมมเบรนมีค่าการนำโปรตอนสูงสุด ดังนี้ ปริมาณแพลทินัมคลอไรด์, อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮโดรราซีน, ปริมาณ Na_2EDTA และปริมาณสารละลายแอมโมเนีย เท่ากับ 5 กรัมต่อลิตร, 2 : 1.5, 80.2 กรัมต่อลิตร และ 198 มิลลิลิตรต่อลิตร ตามลำดับ หลังการเคลือบเมมเบรนทุกชนิดแสดงสมบัติดังนี้ ค่าการนำโปรตอนสูงกว่าก่อนเคลือบ ยอมให้เมทานอลที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2 และ 5 โมลาร์ เท่านั้นแพร่ผ่านเมมเบรนเช่นเดียวกับก่อนเคลือบ โดยมีค่าความเข้มข้นของเพอร์มิเอตเมทานอลอยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 โมลาร์ ที่ทั้งสองความเข้มข้นทั้งก่อนและหลังเคลือบ ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่ต่ำกว่าก่อนเคลือบที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกัน เลือกใช้เมมเบรนแบบโตะของแบบมีการเชื่อมขวางที่ให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุด เท่ากับ $3.97 \times 10^{-3} \pm 7.99 \times 10^{-6}$ ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร นำมาเตรียมเป็นหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรดที่สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 2 นาที ศึกษาสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ความเข้มข้นเมทานอล 2, 5, 10, 15, 20 โมลาร์ และความเข้มข้นสูงสุดที่กำหนด (24.8 โมลาร์) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.437 เป็น 0.513 และ 0.532 โวลต์ เมื่อความเข้มข้นของเมทานอลเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 5 และ 10 โมลาร์ ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุดที่ความเข้มข้นดังกล่าวเท่ากับ $0.9 \pm 3.1 \times 10^{-3}$, $1.0 \pm 9.5 \times 10^{-3}$ และ $1.7 \pm 1.2 \times 10^{-3}$ มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5372550323 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: CHITOSAN MEMBRANE / DIRECT METHANOL FUEL CELL / PLATINUM / ELECTROLESS PLATING

PREETI WANAELO: Pt-PLATED CHITOSAN MEMBRANE FOR DIRECT METHANOL FUEL CELL. ADVISOR: ASSOC. PROF. KHANTONG SOONTARAPA, Ph.D., 69 pp.

This research prepared Pt-plated chitosan membrane by electroless plating technique. The studied membranes were uncrosslinked, crosslinked, doped uncrosslinked and doped crosslinked chitosan membranes. Considering from the through-plane conductivity of the membrane, the plating conditions should be at 60°C for 90 min with the composition as follows: $\text{PtCl}_2 = 5 \text{ g/L}$, $\text{PtCl}_2:\text{N}_2\text{H}_4 = 2:1.5$, $\text{Na}_2\text{EDTA} = 80.2 \text{ g/L}$ and $\text{NH}_3 \text{ solution} = 198 \text{ mL/L}$. The properties of all the plated membranes showed that the proton conductivity was higher than the corresponding unplated membranes, only the 2M and 5M methanol could permeate through both the unplated and plated membranes with the permeated methanol concentration in the range of 0.4 – 0.5 M. The plated membranes showed lower O_2 permeability that increased with temperature. The doped crosslinked membrane with highest conductivity of $3.97 \times 10^{-3} \pm 7.99 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$ was selected for making as MEA. The MEA was pressed at 60°C and 35 kg/cm^2 for 2 min. The cell performance was run at different methanol concentrations; i.e., 2M, 5M, 10M, 15M, 20M and as received (24.8M). The results showed that the open circuit voltages (OCV) increased from 0.437 to 0.513 and 0.532 V when the methanol concentration was increased from 2M to 5M and 10M, respectively. Their maximum power density was $0.9 \pm 3.1 \times 10^{-3}$, $1.0 \pm 9.5 \times 10^{-3}$ and $1.7 \pm 1.2 \times 10^{-3} \text{ mW/cm}^2$, respectively.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature
Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชันทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นवलพรณ จันทศิริ และดร.ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เมมเบรนเพื่อการศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ขนาด 1 kW ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนเพื่อการศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุบุญ จิราญชัย วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat : AUTOLAB type III วิเคราะห์ความสามารถในการนำโปรตอนของเมมเบรน

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง.....	4
2.2.1 เมมเบรน (Membrane).....	6
2.2.2 หน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด (Membrane electrode assembly).....	6
2.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst).....	7
2.2.4 ชั้นการแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer).....	7
2.2.5 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current collector plate).....	8
2.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับประกอบหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด.....	8
2.4 การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless deposition).....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	14
3.1 วัสดุ สารเคมีหลักที่ใช้ในงานวิจัย	14
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์หลักที่ใช้ในงานวิจัย	14
3.3 เครื่องวิเคราะห์หลักที่ใช้ในงานวิจัย.....	15
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	15
3.4.1 ร้อยละการดูดซับและการเปลี่ยนแปลงความหนาในเมทานอลและน้ำ.....	15
3.4.2 การทดสอบค่าการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊ส	16
3.4.3 การวัดสมบัติการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอล	17
3.4.4 การวัดค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนในแนวภาคตัดขวางตามวิธี Two point probe.....	18
3.4.5 การเคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยไม่ใช้ไฟฟ้า	19
3.4.6 การวิเคราะห์สมบัติของเมมเบรนที่เคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยา	20
3.4.7 การเตรียมหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด	20
3.4.8 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	21
3.4.8.1 การประกอบเซลล์เชื้อเพลิง	21
3.4.8.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	22
3.4.8.3 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	24
4.1 ผลการทดสอบสมบัติของเมมเบรน	24
4.1.1 ความสามารถทนต่อแรงดึงและร้อยละการยืด.....	24
4.1.2 ร้อยละการดูดซับน้ำและเมทานอล	25
4.1.3 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา.....	26
4.1.4 ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล.....	27

4.1.5	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน	28
4.1.6	ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนแนวภาคตัดขวาง	29
4.2	ผลการศึกษาสภาวะการเคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เหมาะสม	30
4.2.1	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเคลื่อน	30
4.2.2	ผลขององค์ประกอบในสารละลายเคลื่อน	33
4.2.2.1	ผลของอัตราส่วนโดยมวลแพลทินัมกับไฮโดรเจน	34
4.2.2.2	ผลของปริมาณแพลทินัมคลอไรด์	35
4.2.2.3	ผลของปริมาณไดโซเดียมเอทิลีนไดเอมีนเทตระแอะซีเตด	35
4.2.2.4	ผลของปริมาณสารละลายแอมโมเนีย	36
4.3	ผลการศึกษสมบัติของเมมเบรนหลังเคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม	38
4.3.1	ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล	38
4.3.2	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน	39
4.4	ผลการศึกษาหาสภาวะในการเตรียม Membrane Electrode Assembly (MEA)	40
4.5	ผลการทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว	41
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	43
5.1	สรุปผลการวิจัย	43
5.2	ข้อเสนอแนะ	46
	รายการอ้างอิง	47
	ภาคผนวก	49
	ภาคผนวก ก	50
	ข้อมูลการทดลอง	50
	ภาคผนวก ข	66
	ตัวอย่างการคำนวณ	66

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 69



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2. 1 ชนิดของชั้นโลหะเคลือบที่ได้จากการเคลือบโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า 10

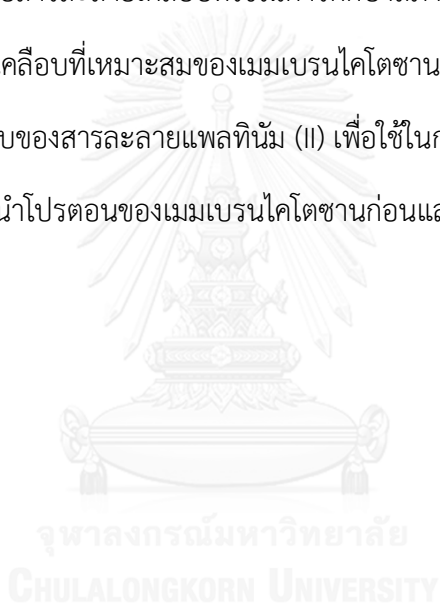
ตารางที่ 3. 1 องค์ประกอบของสารละลายแพลทินัม (II) เพื่อใช้ในการเคลือบเมมเบรน..... 20

ตารางที่ 4. 1 องค์ประกอบสารละลายเคลือบที่ใช้ในการศึกษาสภาวะการเคลือบที่เหมาะสม..... 31

ตารางที่ 4.2 สภาวะการเคลือบที่เหมาะสมของเมมเบรนไคโตซานแต่ละชนิด..... 32

ตารางที่ 4. 3 องค์ประกอบของสารละลายแพลทินัม (II) เพื่อใช้ในการเคลือบเมมเบรน..... 33

ตารางที่ 4. 4 สรุปค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานก่อนและหลังการเคลือบ..... 38



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเมมเบรนแนฟิออน	6
รูปที่ 3. 1 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊ส.....	17
รูปที่ 3. 2 ชุดทดสอบค่าการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอลแบบ Plate and frame module	18
รูปที่ 3. 3 ชุดทดสอบค่าการนำโปรตอนแบบ Two point probe.....	19
รูปที่ 3. 4 แม่แบบและการเตรียมชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ไฟฟ้าบนเมมเบรนโดยตรง	20
รูปที่ 3. 5 เครื่อง Compression Mold: Lab Tech LP20.....	21
รูปที่ 3. 6 ชุดทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	23
รูปที่ 4. 1 ปฏิกริยาและโครงสร้างของเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริก	24
รูปที่ 4. 2 สมบัติเชิงกลของเมมเบรนไคโตซาน a) ความสามารถทนต่อแรงดึง b) ร้อยละการยืด.....	25
รูปที่ 4. 3 ร้อยละการดูดซับน้ำและเมทานอล.....	26
รูปที่ 4. 4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา	27
รูปที่ 4. 5 ความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอล.....	28
รูปที่ 4. 6 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	29
รูปที่ 4. 7 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนในแนวภาคตัดขวาง.....	30
รูปที่ 4. 8 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบต่อค่าค่าการนำโปรตอนของเมมเบรน.....	31
รูปที่ 4. 9 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนก่อนและหลังเคลือบ.....	32
รูปที่ 4. 10 ลักษณะพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัม.....	33
รูปที่ 4. 11 สเปกตรัม EDX แสดงธาตุบนพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัม	33

รูปที่ 4. 12 ผลของอัตราส่วนโดยมวลแพลทินัมกับไฮดราซีนในสารละลายเคลือบ	34
รูปที่ 4. 13 ผลของแพลทินัมคลอไรด์ในสารละลายเคลือบ	35
รูปที่ 4. 14 ผลของปริมาณสาร Na_2EDTA ในสารละลายเคลือบ	36
รูปที่ 4. 15 ผลของปริมาณสารละลายแอมโมเนียในสารละลายเคลือบ.....	37
รูปที่ 4. 16 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานก่อนและหลังเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า	37
รูปที่ 4. 17 ค่าการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอลก่อนและหลังการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า	39
รูปที่ 4. 18 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนก่อนและหลังการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า.....	39
รูปที่ 4. 19 ผลการหาสภาวะการเตรียม MEA จากเมมเบรนไคโตซานแบบโดปของแบบเชื่อม ขวาง.....	40
รูปที่ 4. 20 กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่เตรียมจาก	41
รูปที่ 4. 21 กราฟความหนาแน่นกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่เตรียมจาก เมมเบรนไคโตซานแบบโดปของแบบมีการเชื่อมขวาง ที่ค่าความเข้มข้นเมทานอลต่าง ๆ	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นทรัพยากรที่สำคัญของโลกที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศจากความต้องการพลังงานที่มากขึ้นทำให้แหล่งพลังงานที่สำคัญอย่างเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น ลดลงอย่างรวดเร็ว จากวิกฤตราคาพลังงานที่ปรับตัวขึ้นลง ขณะที่ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ประกอบกับการผลิตไฟฟ้าของประเทศต้องพึ่งพาแก๊สธรรมชาติเป็นหลักมากกว่าร้อยละ 70 [1] จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจังเพื่อช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สะอาดเนื่องจากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการคือน้ำ จึงสามารถช่วยลดสาเหตุภาวะโลกร้อนจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจกของเชื้อเพลิงฟอสซิลได้อีกทางหนึ่งด้วย งานวิจัยนี้มีความสนใจเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cell: DMFC) เนื่องจากมีสมบัติให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานสูง ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ เหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell: PMFC) แต่ใช้เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงจึงมีความอันตรายในเรื่องของถังเก็บเชื้อเพลิงน้อยกว่ากรณีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรงหรือชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนคือเมมเบรน ซึ่งมีหน้าที่หลักเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เป็นตัวกั้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง และเป็นตัวกั้นระหว่างเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้ามาทางขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนที่ป้อนเข้ามาทางขั้วแคโทด ปัจจุบันมีเมมเบรนเพียงชนิดเดียวที่นำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงคือเมมเบรนแนฟิออน ซึ่งมีสมบัติให้ความหนาแน่นของกระแสสูง มีค่าการนำโปรตอนสูง และมีความเสถียรต่อความร้อน แต่เมมเบรนแนฟิออนมีข้อเสียคือต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ราคาแพง และเกิดการแพร่ผ่านของเมทานอลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดได้ [2] ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรงลดลง จึงมีความสนใจศึกษาพัฒนาเมมเบรนไคโดซานเพื่อนำมาใช้แทนเมมเบรนแนฟิออน โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา

[3-5] พบว่ามีความสามารถในการนำมาใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนได้ผลระดับปานกลาง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เตรียมและทดสอบสมบัติของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัม
2. ทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่ใช้เมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมเป็นอิเล็กทรอนิกส์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์สมบัติของเมมเบรนไคโตซานเชิงพาณิชย์ 2 ชนิด คือ แบบไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบมีการเชื่อมขวาง ดังนี้
 - 1.1 สมบัติทางกายภาพ
 - ความสามารถทนต่อแรงดึงและร้อยละการยืด
 - ร้อยละการดูดซับน้ำและเมทานอล
 - 1.2 สมบัติการแพร่ผ่านของเมทานอลที่ความเข้มข้น 2, 5, 10, 15, 20 โมลาร์ และความเข้มข้นสูงสุดที่จำหน่าย (24.8 โมลาร์)
 - 1.3 สมบัติการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
 - 1.4 ค่าการนำโปรตอน
2. แซ่เมมเบรนไคโตซานทั้ง 2 ชนิด ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 1% โดยน้ำหนัก จนสมดุล เรียกว่า เมมเบรนแบบโตนของแบบไม่มีการเชื่อมขวาง และเมมเบรนแบบโตนของแบบมีการเชื่อมขวาง แล้ววิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติการแพร่ผ่านของเมทานอล สมบัติการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และค่าการนำโปรตอน
3. เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าบนเมมเบรนไคโตซาน 4 ชนิด คือ แบบไม่มีการเชื่อมขวาง แบบมีการเชื่อมขวาง เมมเบรนแบบโตนของแบบไม่มีการเชื่อมขวาง และเมมเบรนแบบโตนของแบบมีการเชื่อมขวาง จากสารละลายเคลือบตามงานวิจัยก่อนหน้า [4] และศึกษาผลของตัวแปร ดังนี้
 4. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเมมเบรนและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค SEM และ EDS ตามลำดับ
 - 4.1 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ เท่ากับ 30 - 60 องศาเซลเซียส

- 4.2 ช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลือบ เท่ากับ 30 - 120 นาที
- 4.3 องค์ประกอบของสารละลายที่ใช้ในการเคลือบ (Plating solution)
- ปริมาณแพลทินัมคลอไรด์ เท่ากับ 3, 4 และ 5 กรัม/ลิตร
 - อัตราส่วนโดยมวลระหว่างแพลทินัมคลอไรด์กับสารละลายไฮดราซีน เท่ากับ 2:0.5, 2:1 และ 2:1.5
 - ปริมาณ Na_2EDTA เท่ากับ 20, 40 และ 80 กรัม/ลิตร
 - ปริมาณสารละลายแอมโมเนีย เท่ากับ 99, 198 และ 396 มิลลิลิตร/ลิตร
5. วิเคราะห์สมบัติของเมมเบรนที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ณ อุณหภูมิห้อง ดังนี้
- 5.1 ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลที่ความเข้มข้น 2, 5, 10, 15, 20 โมลาร์ และความเข้มข้นสูงสุดที่กำหนด (24.8 โมลาร์)
- 5.2 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
- 5.3 ค่าการนำโปรตอน
6. เตรียมหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด (Membrane electrode assembly: MEA) โดยศึกษาผลของตัวแปรดังนี้
- 6.1 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด เท่ากับ 40 - 60 องศาเซลเซียส
- 6.2 ความดันที่ใช้ในการอัด เท่ากับ 30 - 55 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
7. ทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่ความเข้มข้นของเมทานอล เท่ากับ 2, 5, 10, 15, 20 โมลาร์ และความเข้มข้นสูงสุดที่กำหนด (24.8 โมลาร์)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สภาวะในการเตรียมเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมสำหรับใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง

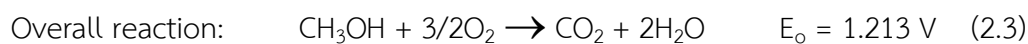
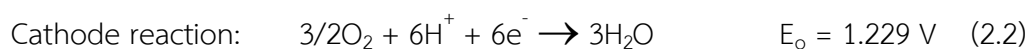
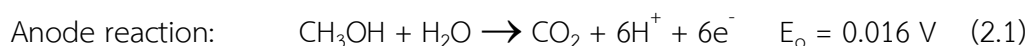
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าที่อาศัยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานเคมีในสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานสูงกว่ากระบวนการเผาไหม้ภายใน ส่งผลให้ช่วยลดการใช้เชื้อเพลิง ผลิตรถยนต์ที่ได้จากการแปรรูปพลังงานจะมีเพียงความร้อนและน้ำเท่านั้น เซลล์เชื้อเพลิงจัดเป็นเซลล์กัลวานิกชนิดหนึ่ง มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบตลอดเวลา ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบ

เซลล์เชื้อเพลิงแบ่งตามประเภทของตามอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ได้เป็น 6 ประเภท คือ

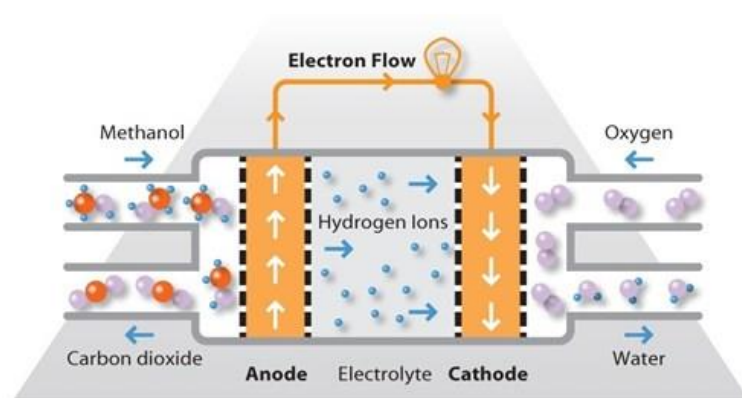
- 1) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell: PMFC)
- 2) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง (Direct methanol fuel cell: DMFC)
- 3) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cells: AFC)
- 4) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cells: PAFC)
- 5) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten carbonate fuel cell: MCFC)
- 6) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell: SOFC)

2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง ซึ่งสนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงซึ่งถูกป้อนเข้าทางขั้วแอโนด เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โปรตอน และอิเล็กตรอน โปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองมายังขั้วแคโทดเช่นเดียวกัน อิเล็กตรอนจะรวมตัวกับโปรตอนและแก๊สออกซิเจนที่ป้อนเข้ามายังขั้วแคโทด เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นโมเลกุลของน้ำ ดังสมการ [6]



โดยหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง แสดงดังรูปที่ 2.1



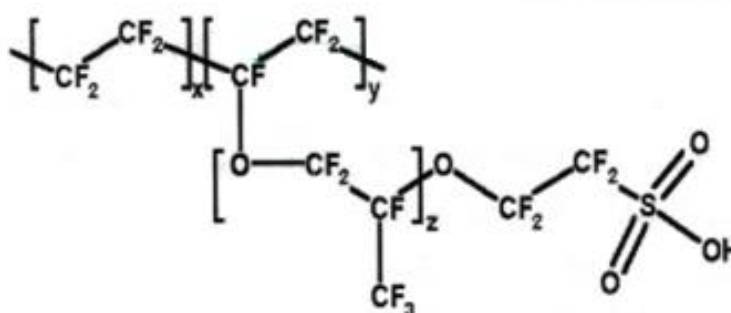
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง [7]

ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง เมมเบรนที่ใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์จะอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว มีลักษณะที่สำคัญคือให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านได้ ขั้วอิเล็กโทรดมีความเป็นรูพรุนและนำไฟฟ้า ส่วนมากทำจากผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) หรือกระดาษคาร์บอน (Carbon paper) ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเมมเบรน ทำให้โมเลกุลเมทานอลซึ่งถูกป้อนเข้าทางด้านขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาให้โปรตอนและอิเล็กตรอน โปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด ซึ่งมีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ระหว่างเมมเบรนและขั้วอิเล็กโทรด ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและอิเล็กตรอนได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ น้ำและแก๊สออกซิเจนส่วนเกินจะถูกขับออกจากเซลล์เชื้อเพลิงจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงออกมา มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์อุณหภูมิตที่ 25°C เท่ากับ (E_0) 1.18 - 1.21 โวลต์ เมื่อผลิตภัณฑ์น้ำอยู่ในเฟสไอหรือเฟสของเหลวตามลำดับ โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าในการระเหยผลิตภัณฑ์น้ำเท่ากับ 0.03 โวลต์ แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดเปิด (Open circuit volt) ที่ดีที่สุดโดยทั่วไปมีค่าเพียง 0.6 - 0.8 โวลต์ [8]

ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ เมมเบรน ขั้วอิเล็กโทรด ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอาจจะเคลือบอยู่บนขั้วอิเล็กโทรดหรือบนเมมเบรน เมมเบรนจะถูกประกอบอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว รวมเรียกว่าหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด (Membrane electrode assembly: MEA) มีรายละเอียดของส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1 เมมเบรน (Membrane)

เมมเบรนทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ควรสมบัติให้ค่าการนำโปรตอนสูง มีความคงทนต่อแรงเชิงกล ทนต่อสารเคมี และไม่ยอมให้เมทานอลหรือแก๊สซึมผ่าน เมมเบรนเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง คือ เมมเบรนประเภทเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิก (Per-fluorosulfonic membrane) หรือซัลโฟเนตฟลูออโรเอทิลีน (Sulfonated fluoroethylene) มีชื่อทางการค้าว่า “เมมเบรนแนฟิออน (Nafion[®] membrane)” ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างเตฟลอน (Tetrafluoroethylene: Teflon) กับ Perfluoro-3,6-dioxo-4-methyl-7-octene sulfonic acid ประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic section) ซึ่งก็คือส่วนเตฟลอน มีพันธะระหว่างฟลูอออรินกับคาร์บอนซึ่งมีความแข็งแรง และส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic section) คือหมู่ซัลโฟนิก (SO₃) ทำหน้าที่ในการดูดซึมโมเลกุลน้ำ โครงสร้างของเมมเบรนแนฟิออนแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเมมเบรนแนฟิออน [9]

2.2.2 หน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด (Membrane electrode assembly)

หน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรดประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ได้แก่ ชั้นเมมเบรนอิเล็กโทรไลต์ ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนดและด้านแคโทด และชั้นการแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer) โดยมีวิธีประกอบชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด 2 วิธี คือเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนดบนด้านหนึ่งของชั้นการแพร่ของแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทดบนชั้นการแพร่ของแก๊สอีกชั้นหนึ่ง แล้วประกบติดเข้ากับเมมเบรน 2 ข้างด้วยเครื่องอัดร้อน ได้เป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดตามลำดับ อีกวิธีหนึ่งคือเคลือบชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนดบนผิวหน้าด้านหนึ่งของเมมเบรน และผิวหน้าอีกด้านหนึ่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทด แล้วจึงประกบติดกับชั้นการแพร่ของแก๊ส 2 ชั้นด้วยเครื่องอัดร้อน

2.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง คือ แพลทินัม (Platinum) เนื่องจากว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการทำให้พันธะ C-H และ C-O ของแอลกอฮอล์แตกตัว มีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอล (Methanol oxidation reaction: MOR) ทางด้านแอโนด และที่แพร่ผ่านเมมเบรนอิเล็กโทรไลต์ไปยังด้านแคโทด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดิกชัน (Oxidation reduction reaction: ORR) แต่มีราคาแพง นอกจากนี้ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอลเกิดโมเลกุลแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO) จากการแตกตัว ดูดซับติดแน่นบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม เพราะมีอนุมูล OH จากการแตกตัวของโมเลกุลน้ำไม่มากพอที่จะเข้าร่วมตัวกับ CO ได้เป็น CO_2 ทำให้มีจำนวนพื้นที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาของแพลทินัมลดลง ทำให้สมรรถนะของเซลล์ลดลง ดังนั้นปัจจุบันมีการเติมโลหะชนิดอื่น เช่น รูทีเนียม (Ruthenium) หรือทองเข้ากับแพลทินัมเพื่อช่วยแก้ปัญหา

2.2.4 ชั้นการแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer)

ชั้นการแพร่ของแก๊สเป็นตัวรองรับทำจากวัสดุรูพรุน ประกอบด้วยอาร์เรย์หนาแน่นของเส้นใยคาร์บอน (Dense array of carbon fibers) เพื่อให้สามารถทำหน้าที่เป็นเส้นทางนำไฟฟ้าได้ด้วย จึงมักทำจากวัสดุ 2 ชนิด คือ กระดาษคาร์บอน (Carbon paper) หรือผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) มีหน้าที่ที่สำคัญดังนี้ [10]

- เป็นช่องทางสำหรับแก๊สหรือสารเริ่มต้นที่ป้อนเข้าจากแผ่นช่องทางการไหลไปยังชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เข้าถึงบริเวณที่จะเกิดปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึง
- กำจัดน้ำผลิตภัณฑ์ออกจากชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อไม่ให้เกิดการท่วมน้ำ แต่ที่พื้นผิวเปียกน้ำได้บางส่วนเพื่อช่วยให้เกิดการนำโปรตอนผ่านเมมเบรน
- เป็นตัวนำอิเล็กตรอนจากชั้นปฏิกิริยาไปยังแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดเป็นวงจรกระแสไฟฟ้า
- ถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าออกจากเซลล์เชื้อเพลิง
- ให้ความแข็งแรงเชิงกลกับหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรดไม่ให้เสียรูปทรงจากการดูดซับน้ำ
- ป้องกันชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการกัดกร่อนหรือสึกกร่อนจากการไหลของแก๊สหรือสารเริ่มต้นหรือปัจจัยอื่น ๆ

ชั้นการแพร่ของแก๊สควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีความเป็นรูพรุนที่เพียงพอ

- ข. มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและนำความร้อน
- ค. บริเวณที่สัมผัสกันระหว่างชั้นการแพร่ของแก๊สและชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต้องไม่ใหญ่เกินไป
- ง. มีความแข็งเพื่อต้านทานหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด แต่ก็ต้องมีความยืดหยุ่นเพื่อให้มีการสัมผัสประจุไฟฟ้าที่ดี

2.2.5 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current collector plate)

แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แผ่นช่องทางเดินแก๊ส (Gas flow field plate) มี 2 แบบ คือ แบบสองขั้ว (Bipolar plate) และแบบขั้วเดียว (Unipolar plate) โดยแบบสองขั้วจะมีความสำคัญกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันหลาย ๆ เซลล์ แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วแต่ละแผ่นจะทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดในเวลาเดียวกัน โดยเป็นขั้วแอโนดของเซลล์หนึ่งและเป็นขั้วแคโทดของเซลล์ที่ติดกัน สำหรับแบบขั้วเดียวจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดหรือขั้วแคโทดอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้ามีหน้าที่หลักดังต่อไปนี้ [10]

- ก. นำไฟฟ้าได้ดี
- ข. แยกแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงที่ติดกัน และป้องกันการรั่วของแก๊สข้ามเซลล์
- ค. มีโครงสร้างที่ต้านทานชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกัน มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา
- ง. นำความร้อน
- จ. ให้การไหลของแก๊สที่สม่ำเสมอ
- ฉ. สามารถขึ้นรูปได้
- ช. ดูดซับน้ำต่ำและไม่สึกกร่อน

2.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับประกอบหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด

การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับประกอบเป็นหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรดแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า (Gas diffusion layer/Catalyst assembly) และการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรน (Membrane/Catalyst assembly) โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรน ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เท่านั้น

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรน สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

- ก. **การพ่น (Spraying)** การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนโดยตรงด้วยวิธีการพ่นจะใช้วิธีการเช่นเดียวกับการพ่นลงบนขั้วไฟฟ้า เพียงแต่เปลี่ยนจากพ่นสารละลายลงบนกระดาษคาร์บอนเป็นการพ่นลงบนเมมเบรนโดยตรง และเมื่อทำการพ่นสารละลายลงบนเมมเบรนทั้งสองด้านแล้วจึงนำไปอัดด้วยความร้อน การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีนี้จะได้ชั้นตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่มีแรงยึดเกาะที่แข็งแรง เหมาะสำหรับการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความหนาไม่เกิน 5 ไมโครเมตร

- ข. **การทา (Painting)** เป็นการทาสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเมมเบรน มีข้อระวังในกรณีใช้กับเมมเบรนที่มีความบางและใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพราะอาจทำให้ได้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนไม่เรียบเสมอกัน ทำให้ความต้านทานภายในเซลล์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังต้องระวังในขั้นตอนของการอบแห้งโดยต้องทำให้แห้งที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อให้อัตราการระเหยของสารละลายต่ำ
- ค. **การเคลือบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless deposition)** เป็นการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเมมเบรนโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารรีดิวซ์และไอออนโลหะในสารละลาย ทำให้เกิดเป็นชั้นโลหะในรูปฟิล์มบางบนผิวชิ้นงาน วิธีนี้เป็นวิธีที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้

2.4 การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless deposition)

การเคลือบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless deposition) คือ กระบวนการจับตัวของโลหะที่ผิวหน้าวัสดุที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นไปแบบอัตโนมัติ (Autocatalytic reaction) ทำให้เกิดเป็นชั้นโลหะเคลือบบนผิวซับสเตรท สารละลายที่ใช้ประกอบด้วยสารละลายของไอออนโลหะและสารรีดิวซ์ อาจมีการเติมสารเติมแต่งทางเคมีชนิดอื่น ๆ ลงไปด้วย เช่น สารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) สารเชิงซ้อน (Complexing agents) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะในสารละลาย แต่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ต้องการบนผิวซับสเตรท สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution) เพื่อควบคุมค่าพีเอช และสารส่งเสริมอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate promotor) เป็นต้น โดยสารรีดิวซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อิเล็กตรอนบนผิวหน้าซับสเตรท ซึ่งถือเป็นผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาที่มีความว่องไว (Active intermediate product) ส่วนไอออนโลหะจะรับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นโลหะพอกพูนขึ้นในรูปของชั้นฟิล์มบางบนผิวซับสเตรท ปฏิกิริยาทั้งสองจะเกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบพร้อมกัน ที่สภาวะคงตัว (Steady state) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทั้งสองปฏิกิริยาจะเท่ากัน และได้ค่าความต่างศักย์รวม (Mixed potential, E_{MP}) ที่มีค่าระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Equilibrium potential, E^0) ของโลหะ (E_M^0) กับสารรีดิวซ์ (E_R^0) นอกจากนี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยายังขึ้นกับตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทั้งสองปฏิกิริยาอีกด้วย

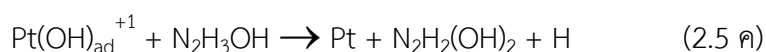
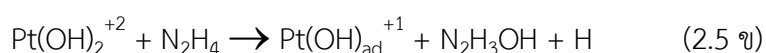
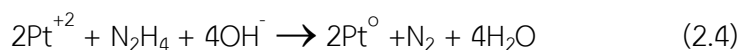
สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมกับโลหะแต่ละธาตุ แสดงดังตารางที่ 2.1 สารรีดิวซ์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโดยไม่ใช้ไฟฟ้าจะมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ การดำเนินของปฏิกิริยาจะเป็นแบบอัตโนมัติเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวผลิตภัณฑ์โลหะที่ต้องการรีดิวซ์ และใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสม

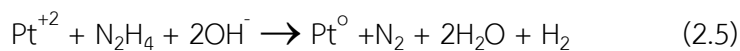
ประสิทธิภาพในการทำงานของสารรีดิวซ์ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากค่า pH ของสารละลาย ซึ่งช่วยให้สารรีดิวซ์แตกตัวได้ดี และยังป้องกันการเกิดตะกอนที่ไม่ต้องการในระบบ

ตารางที่ 2. 1 ชนิดของชั้นโลหะเคลือบที่ได้จากการเคลือบโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า [11]

โลหะ	สารรีดิวซ์						
	H ₂ PO ₄ ⁻	N ₂ H ₄	CH ₂ O	BH ₄ ⁻	RBH ₃	Me ions	Others
Ni	Ni-P	Ni	-	Ni-B	Ni-B	-	-
Co	Co-P	Co	Co	Co-B	Co-B	-	-
Fe	-	-	-	Fe-B	-	-	-
Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	-
Ag	-	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag
Au	-	Au	Au	Au	Au	-	Au
Pd	Pd-P	Pd	Pd	Pd-B	Pd-B	-	-
Rh	-	Rh	-	-	-	-	-
Ru	-	-	-	Ru	-	-	-
Pt	-	Pt	-	Pt	-	-	Pt
Sn	-	-	-	-	-	Sn	-
Pb	-	-	Pb	-	-	-	-

สารไฮดราซีน (N₂H₄) เป็นสารรีดิวซ์ที่แรงในสารละลายแอลคาไลน์ (Aqueous alkaline solution) ปฏิกริยการรีดักชันของไอออนโลหะแพลทินัมด้วยไฮดราซีนในสารละลายแอลคาไลน์แสดงดังสมการที่ (2.4) เมื่อคิดประสิทธิภาพการรีดักชันของไฮดราซีนเป็น 100% กล่าวคือเกิดการรีดักชันของไอออนโลหะเท่านั้น ไม่เกิดแก๊สไฮโดรเจนดังแสดงในสมการที่ (2.5) [12]





โดยตัวห้อย “ad” หมายถึง สปีชีส์ที่ดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ข้อดีของวิธีการเคลือบโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ได้แก่ [11] , [13]

- ก. ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปโดยไม่ต้องอาศัยกระแสไฟฟ้า
- ข. สามารถเคลือบโลหะได้โดยตรงลงเฉพาะบนผิวชิ้นงาน
- ค. กระบวนการเคลือบไม่ซับซ้อน
- ง. ความหนาของชั้นโลหะขึ้นกับปริมาณองค์ประกอบในสารละลายซึ่งผันแปรปริมาณได้ตามต้องการ
- จ. สามารถเคลือบปิดจุดตามด (Pinhole) และบริเวณซอกเล็กซอกน้อย (Recess) ต่าง ๆ มีความหนาสม่ำเสมอ
- ฉ. สามารถตรวจติดตามเติมสารเคมีชัดเจนได้อย่างอัตโนมัติ
- ช. ไม่ต้องมีขั้นตอนการกรองที่ซับซ้อน
- ซ. สามารถตกแต่งให้มีผิวด้าน (Matte) กึ่งเงามัน (Semi bright) หรือแบบเงามัน (Bright) ได้
- ณ. สามารถเคลือบโลหะบนผิวชิ้นงานที่เป็นฉนวนและกึ่งตัวนำได้

ข้อเสียของวิธีการเคลือบโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า คือ

- ก. อายุของสารละลายเคลือบสั้น
- ข. ต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเนื่องจากการเปลี่ยนสารละลายเคลือบใหม่
- ค. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการแพงกว่าวิธีการเคลือบโดยใช้กระแสไฟฟ้า เนื่องจากสารรีดิวซ์มีราคาแพงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าในปริมาณที่สมมูลกัน
- ง. อัตราการพอกพูนโลหะถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วในการรีดักชันไอออนโลหะในสารละลาย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hasani-Sadrabadi และคณะ (2011) [14] ได้เตรียมเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบสองชั้นสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง โดยการเคลือบไคโตซานที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารละลายเชื่อมขวางผสมของกรดซัลโฟซินิกและกลูทาร์ลดีไฮด์ลงบนเมมเบรนแนฟิออน 112 ผลการศึกษาพบว่าเมมเบรนที่ได้ช่วยลดการแพร่ผ่านของเมทานอลลงอย่างมาก เนื่องจากชั้นของเมมเบรนไคโตซานทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นเมทานอล ทำให้ได้ค่าเมมเบรนซีเล็กทิวิตี (Membrane selectivity) ซึ่งนิยามเป็นค่าอัตราส่วนของค่าการนำโปรตอนต่อค่าการแพร่ผ่านเมทานอลสูงกว่าเมมเบรนแนฟิออน 117 อย่างมาก ทำให้เมมเบรนของงานวิจัยนี้ให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงกว่าเมมเบรนแนฟิออน 117

Osifo และคณะ (2010) [15] เตรียมเมมเบรนไคโตซานที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อใช้เป็นเมมเบรนอิเล็กโทรไลต์แทนเมมเบรนแนฟิออนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง โดยทำการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ ความเสถียรต่อความร้อน การแพร่ผ่านของเมทานอล และค่าการนำโปรตอน เปรียบเทียบกับเมมเบรนแนฟิออน 117 พบว่า เมมเบรนแนฟิออนมีความเสถียรทางความร้อนที่ดีกว่าเมมเบรนไคโตซาน แต่เมมเบรนไคโตซานสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าเมมเบรนแนฟิออนถึง 3 เท่า ค่าฟลักซ์โปรตอนผ่านเมมเบรนไคโตซานและเมมเบรนแนฟิออน เท่ากับ 2.73 และ 1.12 โมล/ตารางเซนติเมตร-วินาที ตามลำดับ เมมเบรนไคโตซานยังให้การแพร่ผ่านของเมทานอลที่ต่ำกว่าคือ 1.4×10^{-6} ตารางเซนติเมตร/วินาที ในขณะที่ของเมมเบรนแนฟิออนเท่ากับ 3.9×10^{-6} ตารางเซนติเมตร/วินาที เมื่อนำไปเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาและประกอบเป็นหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด (MEA) แล้วทดสอบสมรรถนะในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง พบว่าเมมเบรนแนฟิออนให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.0075 วัตต์/ตารางเซนติเมตร สูงกว่า MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซาน 2.7 เท่า

Dashtimoghadam และคณะ (2010) [16] เตรียมเมมเบรนไคโตซานโดยการปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารละลายเชื่อมขวางผสมของกรดซัลโฟซินิกและกลูทาร์ลดีไฮด์ ได้ศึกษาผลของการใช้ปริมาณกรดซัลโฟซินิกที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณหมู่ซัลโฟเนตเป็นร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เมมเบรนไคโตซานมีค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นเป็น 0.0452 ซีเมนต์/เซนติเมตร และทำให้ค่าการแพร่ผ่านเมทานอลเพิ่มขึ้นเป็น 9.6×10^{-7} ตารางเซนติเมตร/วินาที ต่ำกว่าเมมเบรนแนฟิออน 117 สองถึงสามเท่า โดยเมมเบรนแนฟิออนให้ค่าการแพร่ผ่านเมทานอลเท่ากับ 2.0×10^{-6} ตารางเซนติเมตร/วินาที เมื่อนำไปทดสอบสมรรถนะในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง โดยใช้ความเข้มข้นของเมทานอล 2 โมลาร์ พบว่าให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ 30 และ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับ 17 และ 41 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำเมมเบร

ดังกล่าว ซึ่งถือเป็นเมมเบรนทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมไปใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง

Xiang และคณะ (2009) [17] เตรียมโคโตซานซัลเฟตโดยการกราฟ (Grafting) โคโตซานกับหมู่ซัลโฟนิคด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก กับกรดคลอโรซัลฟอนิกร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก จากนั้นเตรียมเมมเบรนผสมของโคโตซานกับโคโตซานซัลเฟตที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ตั้งแต่ 1:5 ถึง 1:15 การผสมกันของโคโตซานกับโคโตซานซัลเฟตทำให้เกิดการเชื่อมขวางของหมู่อะมิโนในโคโตซานกับหมู่ซัลโฟนิคในโคโตซานซัลเฟต จากการศึกษาลักษณะสมบัติพบว่าเมมเบรนโคโตซานผสมมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) จากการดูดซับน้ำลดลงเป็นร้อยละ 39.3 ขณะที่การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของเมมเบรนโคโตซานมีค่าเท่ากับร้อยละ 55.1 เมมเบรนโคโตซานผสมที่อัตราส่วน 1:10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทานอลเท่ากับ 4.7×10^{-7} ตารางเซนติเมตร/วินาที ลดลงจากเมมเบรนโคโตซานซึ่งเท่ากับ 1.0×10^{-6} ตารางเซนติเมตร/วินาที และเมมเบรนโคโตซานผสมที่อัตราส่วน 1:10 ให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุด เท่ากับ 3.1×10^{-2} ซีเมนต์/เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

Cui และคณะ (2008) [18] ศึกษาอันตรกิริยาทางไอออนระหว่างกรดซัลฟิวริกและเมมเบรนโคโตซาน โดยใช้เทคนิค FT-IR, XRD และการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Elemental analysis) พบว่าในขั้นแรกหมู่แอมีน (NH_2) ในเมมเบรนโคโตซานถูกโปรตอนด้วยโปรตอน (H^+) จากกรดซัลฟิวริกเกิดเป็นแอมโมเนียมไอออน (NH_3^+) จากนั้นจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) กับแอมโมเนียมไอออนของเมมเบรนโคโตซาน เกิดเป็นสะพานไอออนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ สารเคมีหลักที่ใช้ในงานวิจัย

1. เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane) (commercial grade) : บริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด
 - ก. แบบไม่เชื่อมขวาง (Uncrosslinked chitosan membrane)
 - ข. แบบเชื่อมขวาง (Crosslinked chitosan membrane)
2. ไคโตซาน (Chitosan) (commercial grade) : Eland Corporation Ltd.
3. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก (commercial grade)
4. กรดแอสติติก (CH_3COOH) ความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก (commercial grade)
5. เมทานอล (CH_3OH) ความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก (commercial grade)
6. ไดโซเดียมเอทิลีนไดเอมีนเทตระแอสีเตต (Na_2EDTA) ความเข้มข้นร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก (AR grade)
7. แพลทินัม (II) คลอไรด์ ($PtCl_2$) (purum 60% Pt) ของ Fluka
8. สารละลายแอมโมเนีย (NH_3 solution) ความเข้มข้นร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก (AR grade)
9. สารละลายไฮดราซีน ความเข้มข้นร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก (N_2H_4) (AR grade)
10. แก๊สออกซิเจน (O_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 : Prax Air
11. กระดาษคาร์บอน : ElectroChem, Inc

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์หลักที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่ง (analytical balance) : METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S
2. เตาอบ (Hot air oven) : BINDER รุ่น ED 115
3. โถดูดความชื้น (Desiccator) : SANPLATEC รุ่น C-3W No.0031
4. ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊สแบบความดันคงที่

5. ชุดทดสอบค่าการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอลด้วย Plate and frame module
6. ชุดทดสอบค่าการนำโปรตอนแบบ Two point probe
7. ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวขนาด 2.3×2.3 เซนติเมตร : ElectroChem, Inc
8. ไมโครมิเตอร์
9. ไฮโดรมิเตอร์

3.3 เครื่องวิเคราะห์หลักที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่อง Universal Testing : LLOYD Instrument LR 5K (ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่อง Scanning Electron Microscopy : JEOL รุ่น JSM-6510LV (โครงการส่งเสริมศักยภาพการใช้ชีวภาพและชีวมวลในการผลิตเชื้อเพลิงและเคมีภัณฑ์เพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมและเพื่อการส่งออกเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. เครื่อง Energy Dispersive X-ray spectrometer : รุ่น EDX-720 (ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat : AUTOLAB type III (วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. เครื่อง Compression Mold : Lab Tech LP20 (ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 ร้อยละการดูดซับและการเปลี่ยนแปลงความหนาในเมทานอลและน้ำ

1. ชั่งเมมเบรนแห้ง (w_1) และวัดความหนาของเมมเบรนแห้งด้วยไมโครมิเตอร์ (t_1)
2. แช่ในเมทานอลจนกระทั่งอิ่มตัว ทดสอบความอิ่มตัวโดยนำเมมเบรนที่แช่มาชั่งน้ำหนักทุก 30 นาที จนกระทั่งน้ำหนักคงที่
3. ชั่งน้ำหนักเมมเบรนหลังอิ่มตัว (w_2) และวัดความหนาเมมเบรนหลังอิ่มตัว (t_2)
4. คำนวณค่าร้อยละการดูดซับตามสมการที่ (3.1) และค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาตามสมการที่ (3.2)
5. ทดลองตามข้อ 1 ถึง 3 ซ้ำโดยเปลี่ยนเมทานอลเป็นน้ำ

$$\% \text{ uptake} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100 \quad (3.1)$$

w_1 = น้ำหนักเมมเบรนแห้ง (กรัม)

w_2 = น้ำหนักเมมเบรนหลังแช่จนอิ่มตัว (กรัม)

$$\% \text{ thickness change} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (3.2)$$

t_1 = ความหนาเมมเบรนแห้ง (มิลลิเมตร)

t_2 = ความหนาเมมเบรนหลังแช่จนอิ่มตัว (มิลลิเมตร)

3.4.2 การทดสอบค่าการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊ส

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบค่าการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊สออกซิเจน ด้วยชุดทดสอบดังรูปที่ 3.1 โดยผ่านแก๊สออกซิเจนเข้าไปทางด้านบนของเซลล์เมมเบรน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 ซม. ส่วนด้านขวาออกเปิดสู่บรรยากาศ วัดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนขาออก และอ่านค่าความดันต่างเพื่อนำไปคำนวณค่าการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊สออกซิเจนตามสมการที่ (3.3)

$$P = \frac{QL}{\Delta PA} \quad (3.3)$$

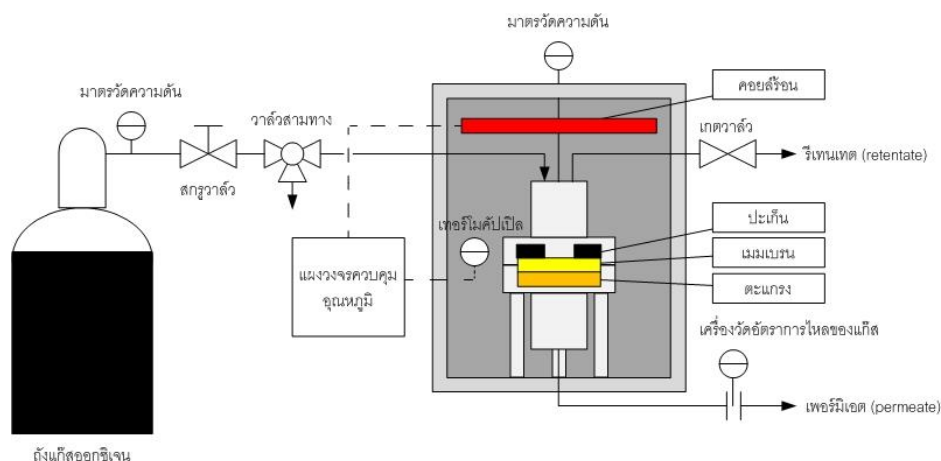
P = ค่าการซึมผ่านแก๊ส ($\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$)

Q = อัตราการไหลของแก๊สผ่านเมมเบรน (cm^3/s)

L = ความหนาของเมมเบรน (cm)

ΔP = ความดันต่าง (cmHg)

A = พื้นที่ของเมมเบรน (cm^2)

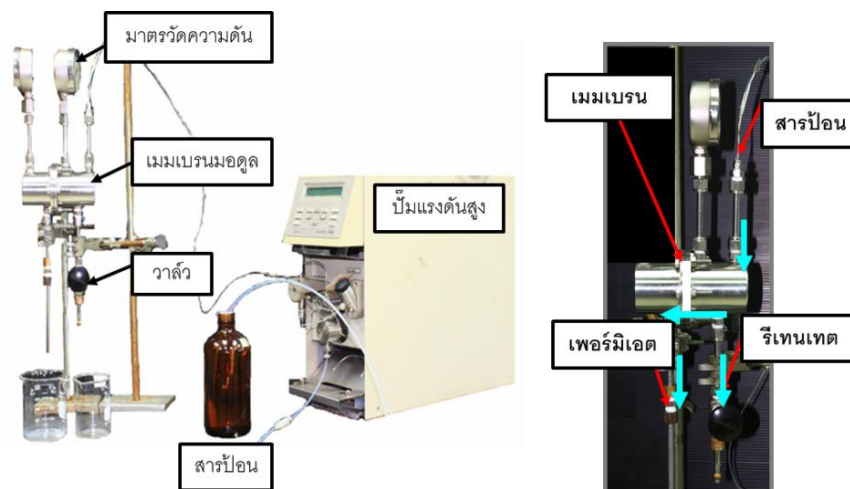


รูปที่ 3. 1 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊ส

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบค่าการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิ 30, 60, และ 90 องศาเซลเซียส แสดงในหน่วยแบเรอร์ (Barrer) โดย 1 แบเรอร์ = 10^{-10} $(\text{cm}^3(\text{STP})\cdot\text{cm})/(\text{s}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{cmHg})$

3.4.3 การวัดสมบัติการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอล

1. ตัดเมมเบรนเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม.
2. ประกอบเมมเบรนเข้ากับชุดทดสอบค่าการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอลแบบ Plate and frame module ดังรูปที่ 3.2
3. เปิดปั๊มเพื่อทำการปั๊มเมทานอลเข้าสู่ระบบ และปรับระดับแรงดันให้ได้ค่าตามที่ต้องการ
4. รอจนกระทั่งได้เพอร์มิเอต (Permeate) แพร่ผ่านออกมาจากระบบ เก็บตัวอย่างของเพอร์มิเอตไปวัดความเข้มข้นด้วยไฮโดรมิเตอร์
5. ทำตามขั้นตอนข้างต้นซ้ำในทุกความเข้มข้นของเมทานอลที่กำหนดไว้คือ 2, 5, 10, 15, 20 โมลาร์ และความเข้มข้นสูงสุดที่จำหน่าย (24.8 โมลาร์)



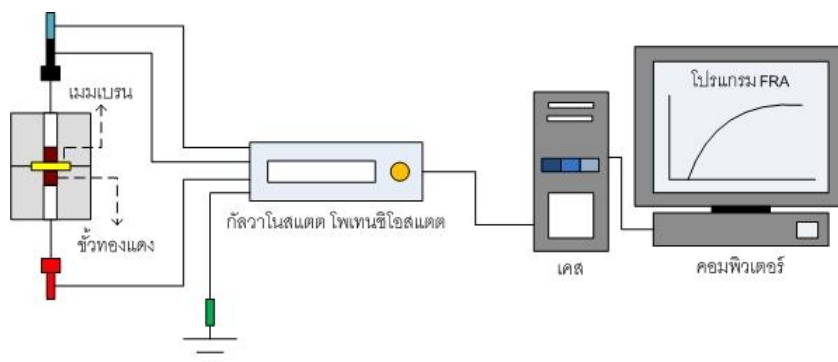
รูปที่ 3. 2 ชุดทดสอบค่าการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอลแบบ Plate and frame module

3.4.4 การวัดค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนในแนวภาคตัดขวางตามวิธี Two point probe

1. เปิดชุดทดสอบค่าการนำโปรตอนดังรูปที่ 3.3 แล้วต่อสายไฟเข้ากับกล่องสัญญาณ กดปุ่ม Start เลือก Diagnostic
2. กดปุ่ม All run test บนหน้าจอโปรแกรม Diagnostic รอจนกระทั่งการตรวจสอบเสร็จสิ้น จึงกดปุ่ม Exit
3. เปิดโปรแกรม FRA
4. ตัดเมมเบรนเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. แช่เมมเบรนในน้ำกลั่น 10 นาที แล้วจึงนำมาวัดความหนา บันทึกค่าความหนาที่วัดได้ (L)
5. ทา Colloidal silver บนขั้วทองแดงทั้งสองขั้ว แล้วจึงวางเมมเบรนลงบนขั้วทองแดง เพื่อเป็นการลดผลของค่าความต้านทานเนื่องจากผิวสัมผัส
6. ต่อขั้วทองแดงเข้ากับเครื่อง Potentiostat/Galvanostat
7. กดปุ่ม Start ในโปรแกรม FRA รอจนกระทั่งเครื่องสแกนความถี่จนเสร็จ โดยตั้งช่วงความถี่ไว้ที่ 0.5 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1 เฮิรตซ์
8. บันทึกค่าความต้านทานของเมมเบรน (R) จากจุดตัดแกน x ของเส้นโค้ง Nyquist เพื่อนำมาคำนวณค่าการนำโปรตอน (σ) ตามสมการที่ 3.4

$$\sigma = \frac{1}{R} \left(\frac{L}{A} \right) \quad (3.4)$$

σ	=	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
R	=	ความต้านทาน (โอห์ม)
L	=	ความหนาของเมมเบรนหลังจากแช่น้ำ (เซนติเมตร)
A	=	พื้นที่หน้าตัดขั้วของแดงเท่ากับ 0.4418 (ตารางเซนติเมตร)



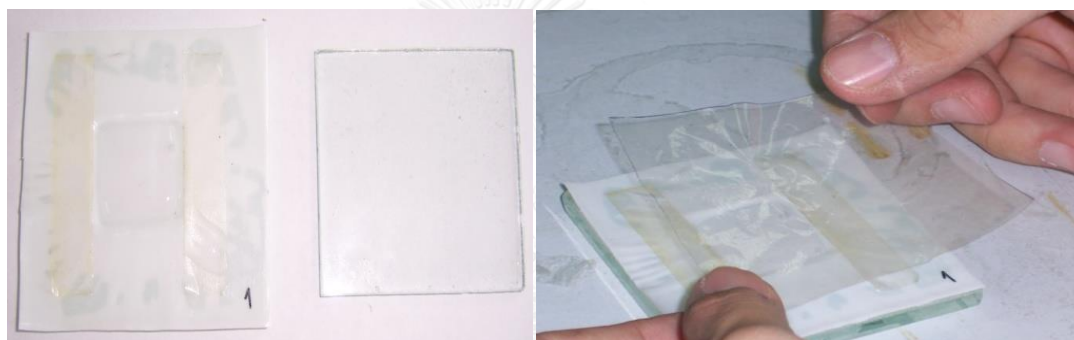
รูปที่ 3. 3 ชุดทดสอบค่าการนำโปรตอนแบบ Two point probe

3.4.5 การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

1. เตรียมสารละลายแพลทินัม (II) โดยมีองค์ประกอบตามตารางที่ 3.1 เพื่อเตรียมเป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเมมเบรนโดยตรง เนื่องจากไฮดราซีนไม่เสถียรจึงต้องเตรียมไฮดราซีนในปริมาณที่ต้องการใช้แยกไว้ก่อน
2. เมื่อต้องการจะเคลือบ จึงหยุดสารละลายแพลทินัมและไฮดราซีนลงในหลุมของภาดเทฟลอนขนาด 2.3×2.3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4
3. วางเมมเบรนขนาด 7×7 ตารางเซนติเมตร ลงบนภาดเทฟลอน โดยให้ผิวของเมมเบรนสัมผัสกับสารละลายพอดี แล้วจึงปิดทับด้วยแผ่นกระจกเพื่อให้เกิดการสัมผัสตลอดเวลา
4. นำภาดเทฟลอนวางในตู้อบเพื่อควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบตามที่กำหนด คือ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และ 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ
5. หยุดสารละลายแพลทินัมและไฮดราซีนลงในหลุมของภาดเทฟลอนใหม่ และทำเช่นเดียวกันกับอีกด้านของเมมเบรนที่สภาวะเดียวกัน
6. นำเมมเบรนออกจากตู้อบ ล้างด้วยน้ำกลั่น และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
7. เก็บเมมเบรนที่เตรียมได้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอนำไปวิเคราะห์การมีอยู่จริงของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และนำไปประกอบเป็นหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assembly : MEA) ต่อไป

ตารางที่ 3. 1 องค์ประกอบของสารละลายแพลทินัม (II) เพื่อใช้ในการเคลือบเมมเบรน

สารเคมี	ปริมาณ
PtCl ₂	3, 4, 5 (g/L)
N ₂ H ₄	(1.8, 3.6, 5.4), (2.4, 4.8, 7.2), (3, 6, 9) (mL/L)
PtCl ₂ : Hydrazine (molar ratio)	2 : 0.5, 2 : 1, 2 : 1.5
Na ₂ EDTA	20.05, 40.1, 80.2 (g/L)
NH ₃ solution	99, 198, 396 (mL/L)
pH	9.81



รูปที่ 3. 4 แม่แบบและการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ไฟฟ้าบนเมมเบรนโดยตรง

3.4.6 การวิเคราะห์สมบัติของเมมเบรนที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ดูการกระจายตัวของอนุภาคแพลทินัมบนผิวเมมเบรนโดยเครื่อง Scanning Electron Microscopy : SEM
2. วิเคราะห์ปริมาณแพลทินัมบนผิวของเมมเบรนโดยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectrometer : EDX

3.4.7 การเตรียมหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด

1. นำเมมเบรนที่ผ่านการเคลือบแพลทินัมแล้ว มาประกบทั้งสองด้านด้วยขั้วไฟฟ้าที่ทำจากกระดาษคาร์บอนขนาด 2.3 x 2.3 ตารางเซนติเมตร โดยทาสารละลายไคโตซานเข้มข้น ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก บนขั้วไฟฟ้าให้ทั่วก่อนนำมาประกบกับเมมเบรน
2. ใช้แผ่นพลาสติกกันความร้อนรองด้านนอกของขั้วไฟฟ้า ประกบอีกครั้งด้วยแผ่นเหล็ก

3. อัดด้วยเครื่องอัดตั้งรูปที่ 3.5 โดยใช้ความดันและอุณหภูมิที่กำหนด คือที่ความดัน 35, 40, 45, 50 และ 55 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที โดยที่แต่ละสภาวะต้องตามด้วยการอัด ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 นาที ทุกครั้ง
4. เก็บหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรดที่เตรียมได้ในโถดูความชื้น เพื่อรอการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3. 5 เครื่อง Compression Mold: Lab Tech LP20

3.4.8 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

3.4.8.1 การประกอบเซลล์เชื้อเพลิง

1. ประกอบหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด (MEA) ที่เตรียมได้เข้ากับแผ่นนำไฟฟ้า (Unipolar plate) และแผ่นนำความร้อน (Heater) ให้บริเวณขั้วไฟฟ้าอยู่ตรงกับช่องทางการไหลของแก๊ส โดยมีแผ่นเทฟลอนช่วยป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส
2. ใช้แรงในการประกอบเซลล์เท่ากับ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. นำเซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบแล้วติดตั้งกับหน่วยทดสอบตั้งรูปที่ 3.6 โดยต่อท่อเมทานอลและแก๊สขาเข้าและขาออกกับเซลล์ทั้งทางด้านแคโทดและแอโนด

3.4.8.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้าของแก๊สแต่ละชนิดให้ปิด - เปิดอยู่ในทิศทางตามต้องการ เพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สชนิดต่าง ๆ และตั้งวาล์วขาออกให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. ตรวจสอบระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำของระบบให้ความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม
3. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สทุกถังให้อยู่ในตำแหน่งปิด
4. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อจากขั้วไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 2 ขั้ว ที่ต่อมายังเครื่อง Potentiostat/Galvanostat ให้อยู่ในสภาพที่ต่อเรียบร้อย
5. ตรวจสอบเทอร์มอคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
6. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สและเมทานอล โปรแกรม General purpose electrochemical systems หรือ GPES
7. เปิดสวิตช์ที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์หลัก (Main Switch) แล้วจึงเปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์ตามต้องการ (60 องศาเซลเซียส) เปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามค่าที่ตั้งไว้
8. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (100 Sccm) ซึ่งช่อง 2 คือ แก๊สออกซิเจนหรืออากาศ ส่วนของแก๊สไนโตรเจนจะใช้ทั้งช่อง 2 และช่อง 3 โดยเปลี่ยนทางเดินของแก๊สโดยใช้วาล์วขาเข้าเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส
9. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออกตามต้องการ ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 50 psi แล้วจึงเปิดสวิตช์ที่เครื่องวัดอัตราการไหลแต่ละช่อง เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ
10. ก่อนจะทำการทดลอง ควรใช้แก๊สไนโตรเจนกับหน่วยทดสอบประมาณ 20 นาที โดยตั้งอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 ช่อง ไว้ที่ 100 Sccm เพื่อเป็นการไล่สิ่งสกปรกค้างอยู่ในหน่วยทดสอบ และตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบการรั่วภายในหน่วยทดสอบ
11. เมื่อมีการป้อนเมทานอลและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ให้รอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟของเซลล์เชื้อเพลิง (Open circuit voltage) ที่ได้มีค่าคงที่
12. ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบโพลาริเซชัน จากโปรแกรม GPES โดยตั้งค่าทดสอบให้วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ในช่วง 0.01 โวลต์ ไปจนถึง

ค่าความต่างศักย์ขณะวงจรเปิด แล้วนำผลการทดลองไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 3. 6 ชุดทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

3.4.8.3 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง

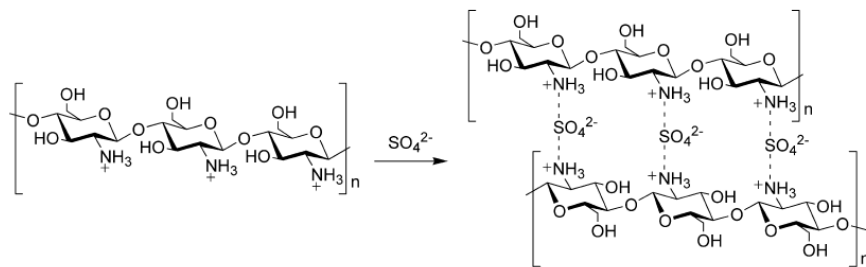
1. เมื่อเสร็จสิ้นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. ปิดสวิตซ์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่ถังแก๊สทุกถัง
3. ปิดวาล์วขาเข้าทุกตัว และค่อย ๆ เปิดวาล์วขาออกทีละตัว เพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนกระทั่งมาตรวัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึง 0 ทั้งขาเข้าและขาออก แล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่งทำในลักษณะเดียวกัน
4. ปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิตซ์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวที่แผงสวิตซ์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า
6. ปิดสวิตซ์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิตซ์ควบคุมแหล่งไฟฟ้า แล้วจึงปิดสวิตซ์หลัก
7. ปิดสวิตซ์ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบสมบัติของเมมเบรน

เมมเบรนไคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง และแบบเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริก มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.1 แล้วแช่เมมเบรนไคโตซานทั้ง 2 ชนิด ในสารละลายกรดซัลฟูริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จนสมดุล เรียกว่า เมมเบรนแบบโคมของแบบไม่มีการเชื่อมขวาง และเมมเบรนแบบโคมของแบบมีการเชื่อมขวาง

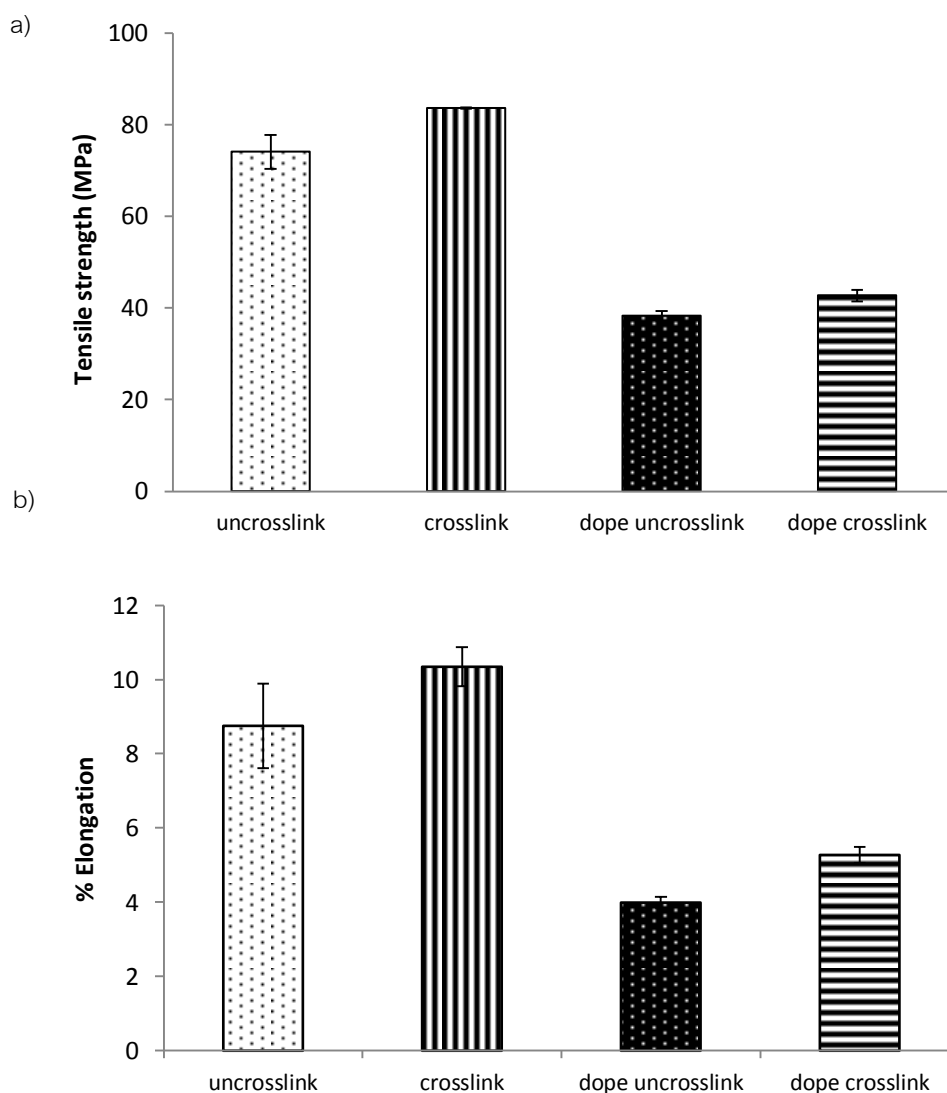


รูปที่ 4. 1 ปฏิกริยาและโครงสร้างของเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริก [18]

4.1.1 ความสามารถทนต่อแรงดึงและร้อยละการยืด

ความหนาของเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง และแบบเชื่อมขวางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เท่ากับ 45.6 ± 3.2 และ 55.0 ± 5.3 ไมครอน ตามลำดับ ของเมมเบรนแนฟิออน 117 เท่ากับ 183 ไมครอน [19] ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 882 ของเมมเบรนไคโตซาน 4 ชนิด คือ แบบไม่เชื่อมขวาง, แบบเชื่อมขวาง, แบบโคมของแบบไม่เชื่อมขวาง และแบบโคมของแบบเชื่อมขวาง แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า ความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนทั้ง 4 ชนิด มีค่าเท่ากับ 74.1 ± 3.7 , 83.6 ± 0.2 , 38.3 ± 1.1 และ 42.7 ± 1.3 เมกะปาสคัล ตามลำดับ และมีค่าร้อยละการยืด เท่ากับ 8.8 ± 1.1 , 10.3 ± 0.5 , 4.0 ± 0.1 และ 5.3 ± 0.2 ตามลำดับ ขณะที่เมมเบรนแนฟิออน 117 มีค่าทั้งสองจากการทดลองเท่ากับ 29.5 ± 0.6 เมกะปาสคัล และ 352.5 ± 2.1 ตามลำดับ (ค่าทั้งสองจากเอกสารแสดงลักษณะเฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ณ อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เท่ากับ 43 เมกะปาสคัล และร้อยละ 225 ตามลำดับ [19]) แสดงว่าเมมเบรนไคโตซานมีสมบัติเชิงกล (Mechanical strength) เพียงพอสำหรับใช้เป็นเมมเบรนอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์เชื้อเพลิง โดยเมมเบร

นแบบเชื่อมขวางทนต่อแรงดึงได้มากกว่าแบบไม่เชื่อมขวางทั้งในสภาพดั้งเดิม (Virgin) และถูกโอบด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในทำนองเดียวกันเมมเบรนแนฟิออน 117 หลังแช่ให้อิ่มตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ค่าทั้งสองมีค่าลดลงเป็น 34 เมกะปาสคัล และร้อยละ 200 ตามลำดับ [19]

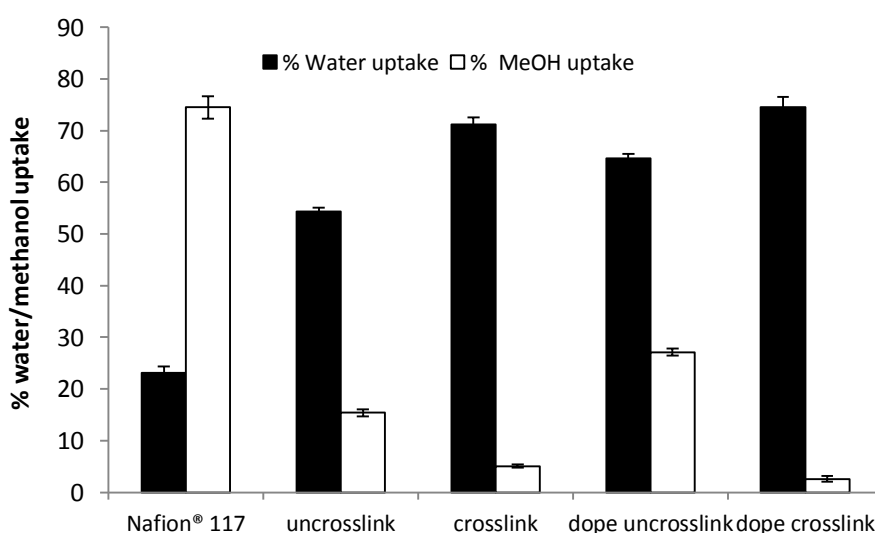


รูปที่ 4. 2 สมบัติเชิงกลของเมมเบรนไคโตซาน a) ความสามารถทนต่อแรงดึง b) ร้อยละการยืด

4.1.2 ร้อยละการดูดซับน้ำและเมทานอล

รูปที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาการดูดซับน้ำและเมทานอลเข้มข้นของเมมเบรนไคโตซาน 4 ชนิด เทียบกับเมมเบรนแนฟิออน 117 พบว่าเมมเบรนไคโตซานทั้งหมดดูดซับน้ำได้สูงมากในช่วงร้อยละ

ละ 54.3 - 74.6 โดยน้ำหนัก โดยเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวางดูดซับน้ำได้มากกว่าแบบไม่เชื่อมขวาง และการถูกโคปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้เมมเบรนไคโตซานทั้ง 2 แบบดูดซับน้ำได้มากขึ้น เมมเบรนแนฟิออน 117 ดูดซับน้ำได้เพียงร้อยละ 23.1 ± 1.2 โดยน้ำหนัก แต่สามารถดูดซับเมทานอลเข้มข้นได้สูงมาร้อยละ 74.5 ± 2.2 โดยน้ำหนัก สูงกว่าเมมเบรนไคโตซานทั้ง 4 แบบ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.6 - 27.1 โดยน้ำหนัก ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรงโดยทั่วไป ซึ่งใช้เมมเบรนแนฟิออนต้องดำเนินการที่ความเข้มข้นต่ำๆ (1 - 3 โมลาร์) เพื่อลดการสูญเสียของเชื้อเพลิงเมทานอลจากการแพร่ผ่านเมมเบรน (Crossover) จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด แต่ความเข้มข้นของเมทานอลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังไฟฟ้า ดังนั้นในทางอุดมคติจึงต้องการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรงที่สามารถใช้งานได้กับเมทานอลความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งอาจเป็นไปได้เมื่อใช้กับเมมเบรนไคโตซาน

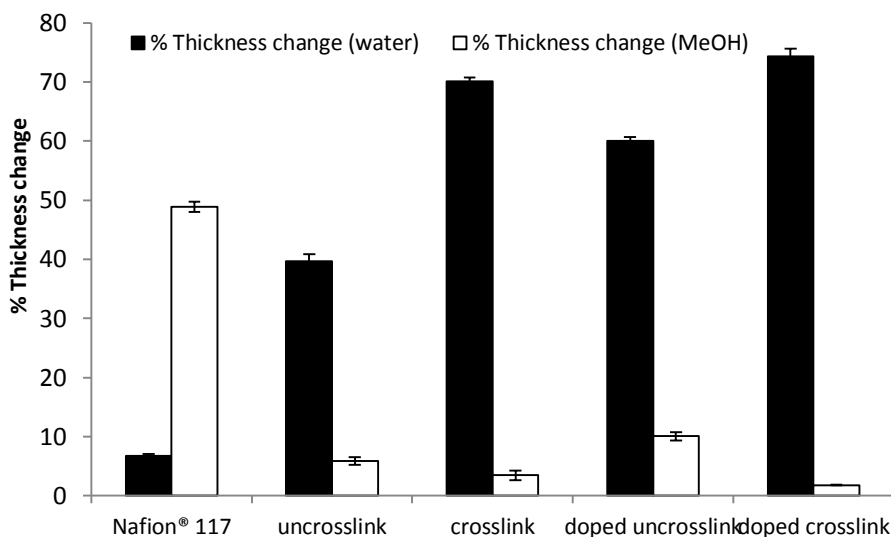


รูปที่ 4. 3 ร้อยละการดูดซับน้ำและเมทานอล

4.1.3 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนไคโตซานและเมมเบรนแนฟิออน 117 หลังการดูดซับในน้ำและเมทานอล แสดงในรูปที่ 4.4 สอดคล้องกับสมบัติการดูดซับน้ำและเมทานอล โดยเมมเบรนไคโตซานมีการบวมน้ำมากกว่าเมมเบรนแนฟิออน 117 แต่บวมตัวในเมทานอลน้อยกว่า จากการทดลองพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนแนฟิออน 117 จากการบวมน้ำ ณ อุณหภูมิห้อง เท่ากับร้อยละ 6.7 ± 0.3 เมื่อเทียบกับค่าจากเอกสารลักษณะเฉพาะของผู้ผลิต ซึ่งเท่ากับ

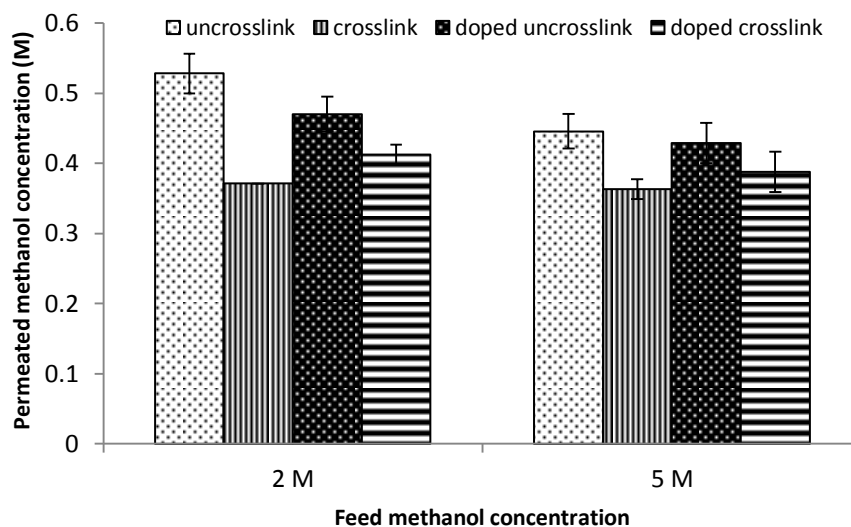
10 [19] แสดงความยอมรับได้ของผลการทดลองในหัวข้อนี้ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือน้อยที่สุดจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัด



รูปที่ 4. 4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

4.1.4 ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล

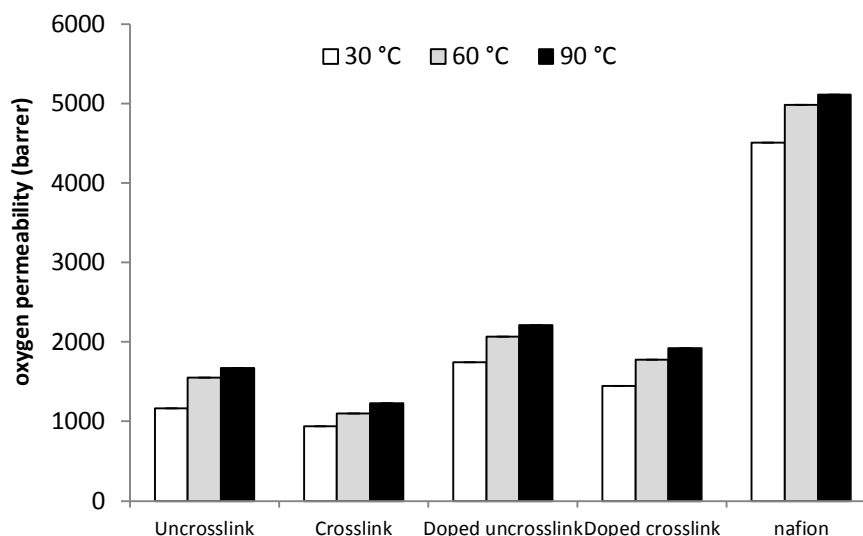
งานวิจัยนี้วัดความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอลด้วยอุปกรณ์มอดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame) ที่ความเข้มข้นของเมทานอลเข้าเท่ากับ 2, 5, 10, 15, 20 โมลาร์ และความเข้มข้นสูงสุดที่กำหนด (24.8 โมลาร์) ณ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และความดัน 100 ปอนด์/ตารางนิ้ว พบว่า ที่ความเข้มข้น 2 และ 5 โมลาร์ เท่านั้น ที่เกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนไคโตซานออกมา และมีความเข้มข้นของเมทานอลขาออกลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงว่าเมมเบรนไคโตซานสามารถลดการเกิด Crossover ของเชื้อเพลิงเมทานอลข้ามเมมเบรนจากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทดได้ จนถึงสามารถหยุดการเกิด Crossover ได้เมื่อใช้ความเข้มข้นสูงขึ้น ผลการศึกษาในส่วนนี้แสดงว่า โมเลกุลน้ำในสารละลายเมทานอลเป็นองค์ประกอบที่เคลื่อนที่ผ่านหมู่ขบวนการของเมมเบรนไคโตซานและดึง (Drag) เอาโมเลกุลเมทานอลตามออกมาด้วย เมื่อความเข้มข้นของเมทานอลในสารป้อนมากขึ้น เกรเดียนต์ความเข้มข้นของโมเลกุลน้ำคร่อมเมมเบรนไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนจึงไม่เกิดการ Crossover ของเมทานอล



รูปที่ 4. 5 ความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอล

4.1.5 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

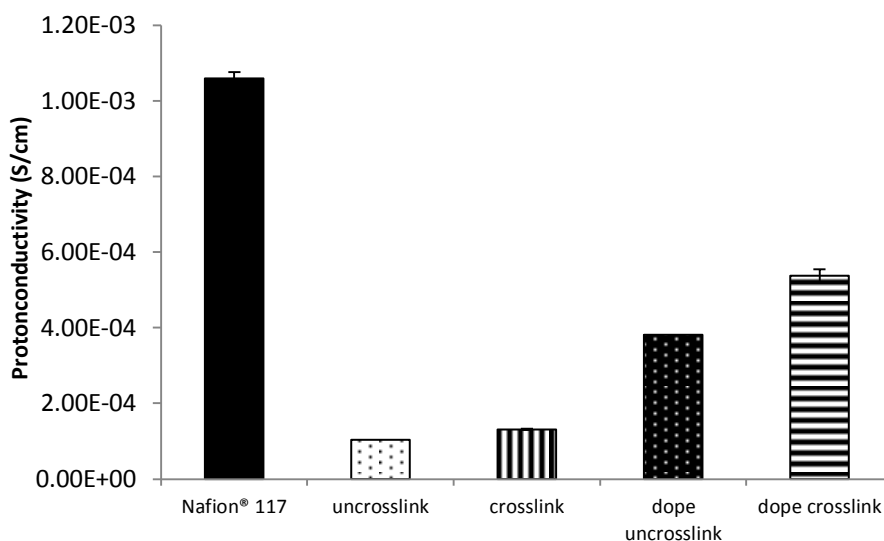
รูปที่ 4.6 แสดงผลการซึมผ่านเมมเบรนชนิดต่าง ๆ ของแก๊สออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าเมมเบรนทุกชนิดให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตามกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius law) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้พอลิเมอร์มีพลังงานภายในสูงขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้นทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์หรือปริมาตรอิสระเพิ่มมากขึ้น แก๊สออกซิเจนจึงซึมผ่านไปได้มากขึ้น โดยเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวางให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่ำกว่าแบบไม่เชื่อมขวาง เมื่อถูกโดยด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกทำให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนสูงขึ้นกว่าในสภาพดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม เมมเบรนไคโตซานทุกชนิดให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่ำกว่าเมมเบรนแนฟิออน 117 สองถึงสามเท่า ซึ่งค่านำมาจากสาเหตุที่เมมเบรนแนฟิออน 117 มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วค่าแรกของสายโซ่หลักในเมทริกซ์พอลิเมอร์เท่ากับ 125 องศาเซลเซียส และค่าที่สองของสายโซ่กิ่ง (Side chain) หมู่กรดซัลโฟนิค (Sulfonic acid functional group) เท่ากับ 195 องศาเซลเซียส [20] ต่ำกว่าของเมมเบรนไคโตซานซึ่งเท่ากับ 203 องศาเซลเซียส [21] การซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้มากเกินไป น่าจะมีผลทำให้ได้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง หรืออาจทำให้ต้องสิ้นเปลืองปริมาณแก๊สออกซิเจนเพื่อการเกิดปฏิกิริยารีดักชันรวมตัวกับโปรตอนและอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด



รูปที่ 4. 6 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.1.6 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนแนวภาคตัดขวาง

ค่าการนำโปรตอนในแนวภาคตัดขวาง (Through plane conductivity) ของเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง, แบบเชื่อมขวาง, แบบโद्यของแบบไม่เชื่อมขวาง, แบบโद्यของแบบเชื่อมขวาง และของเมมเบรนแนฟิออน 117 มีค่าเท่ากับ $1.04 \times 10^{-4} \pm 1.6 \times 10^{-6}$, $1.31 \times 10^{-4} \pm 1.6 \times 10^{-5}$, $3.81 \times 10^{-4} \pm 6.0 \times 10^{-6}$, $5.38 \times 10^{-4} \pm 4.55 \times 10^{-6}$ และ $1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเทียบค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนแนฟิออน 117 ซึ่งวัดได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Gardner และ Anantaraman [22] ที่รายงานไว้เท่ากับ 24 มิลลิซีเมนส์/เซนติเมตร มีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องจากผลของเทคนิคการวัดและผลการบำบัดเมมเบรนขั้นต้น (Sample pretreatment) ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 4.7 แสดงว่าค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานแบบโद्यของแบบเชื่อมขวาง > แบบโद्यของแบบไม่เชื่อมขวาง > แบบเชื่อมขวาง > แบบไม่เชื่อมขวาง โดยค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนแนฟิออน 117 มีค่ามากกว่าของเมมเบรนไคโตซานสองถึงสี่เท่า



รูปที่ 4. 7 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนในแนวภาคตัดขวาง

4.2 ผลการศึกษาสภาวะการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้เตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนเมมเบรนโดยตรง ด้วยวิธีการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงผลของตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบ และผลขององค์ประกอบในสารละลายเคลือบต่อค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนโคโตะซานทั้ง 4 ชนิด ดังนี้

4.2.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบ

จากองค์ประกอบสารละลายเคลือบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ได้ผลการศึกษาสภาวะการเคลือบดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงค่าการนำโปรตอนที่แต่ละสภาวะการเคลือบของเมมเบรนโคโตะซานแต่ละชนิด และได้สรุปสภาวะการเคลือบที่ให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุดในตารางที่ 4.2 พบว่า เมมเบรนแบบโดปของแบบเชื่อมขวางให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุด และแบบไม่เชื่อมขวางให้ค่าการนำโปรตอนต่ำสุดที่ทุกสภาวะการเคลือบ โดยการเคลือบเมมเบรนทุกชนิดที่อุณหภูมิน้อยกว่า 60 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลานานไม่น้อยกว่า 120 นาที ให้ค่าการนำโปรตอนอยู่ในช่วง 1.3×10^{-3} - 3.0×10^{-3} ซีเมนส์/เซนติเมตร แต่สามารถลดเวลาในการเคลือบเหลือ 90 นาที เมื่อใช้อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าการนำโปรตอนอยู่ในช่วง 1.5×10^{-3} - 3.3×10^{-3} ซีเมนส์/เซนติเมตร ซึ่งเป็นสภาวะอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบที่ให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุด

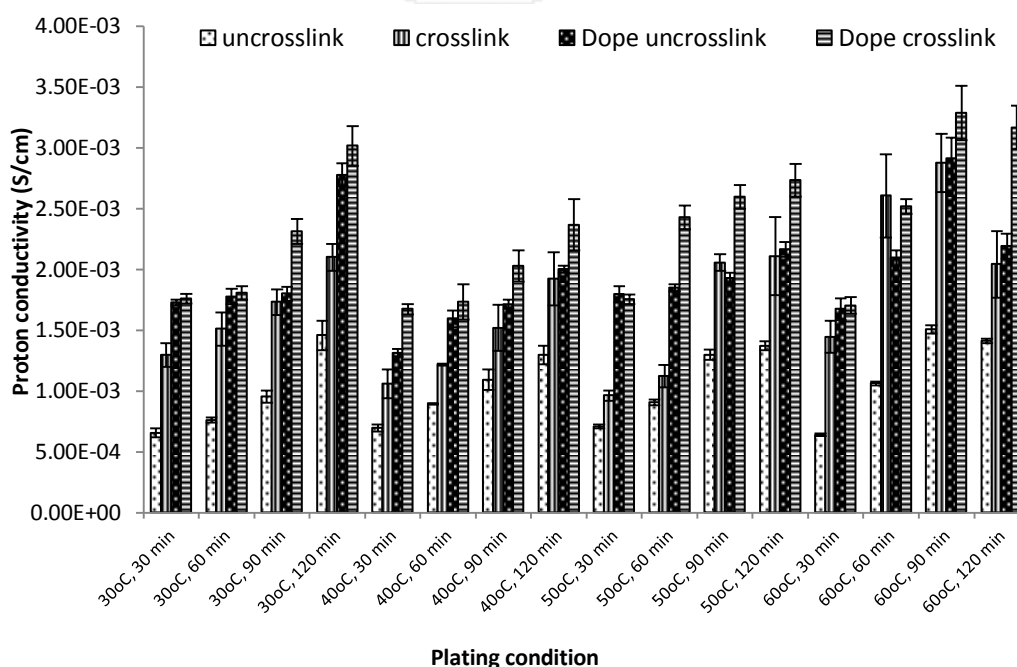
นอกจากนั้น ยังพบว่า การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนเมมเบรนทำให้ได้ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นกว่าก่อนการเคลือบอย่างมาก ดังรูปที่ 4.9 แสดงว่างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนเมมเบรนโดยตรงด้วยวิธีการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า จากการดูลักษณะสัณฐานพื้นผิวด้วย SEM ของเมมเบรนโคโตะซานแบบเชื่อมขวางที่ทำการเคลือบตัวเร่ง

ปฏิกิริยาแพลทินัม ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที ดังรูปที่ 4.10 พบอนุภาคอื่นบนพื้นผิวของเมมเบรน ซึ่งเมื่อตรวจสอบจากสเปกตรัม EDX ดังรูปที่ 4.11 พบว่ามีพีคของโลหะแพลทินัมอยู่ด้วย จึงยืนยันได้ว่าพื้นผิวของเมมเบรนโคโตะซานมีอนุภาคแพลทินัมเคลือบติดอยู่จริง

สรุปสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนเมมเบรนโคโตะซานโดยตรง คือ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที เช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ซึ่งจะใช้สภาวะการเคลือบนี้ศึกษาผลขององค์ประกอบสารละลายเคลือบต่อไป

ตารางที่ 4. 1 องค์ประกอบสารละลายเคลือบที่ใช้ในการศึกษาสภาวะการเคลือบที่เหมาะสม

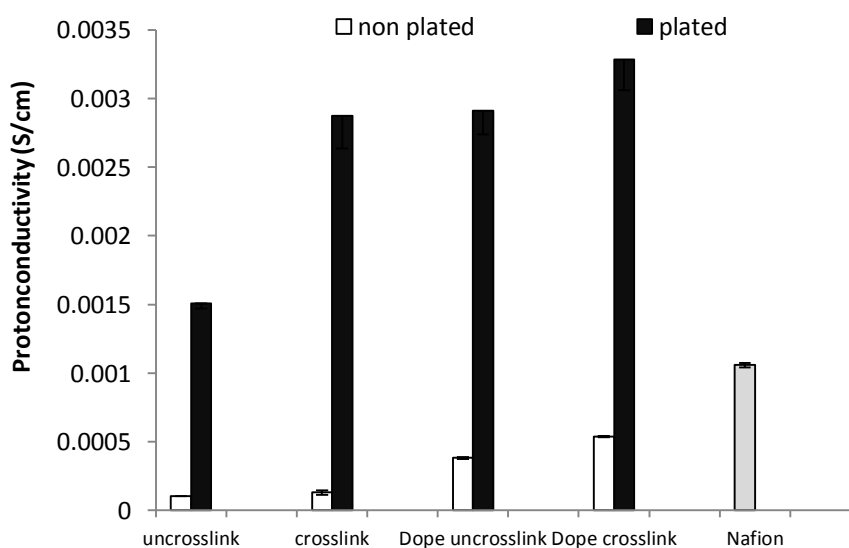
สาร	ปริมาณ
PtCl ₂	5 g/L
N ₂ H ₄ (99.5 %w/w)	6 mL/L
PtCl ₂ : Hydrazine (molar ratio)	2 : 1
Na ₂ EDTA	40.1 g/L
NH ₃ solution (28 %w/w)	198 mL/L
Total volume	1 L



รูปที่ 4. 8 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบต่อค่าการนำโปรตอนของเมมเบรน

ตารางที่ 4.2 สภาวะการเคลือบที่เหมาะสมของเมมเบรนไคโตซานแต่ละชนิด

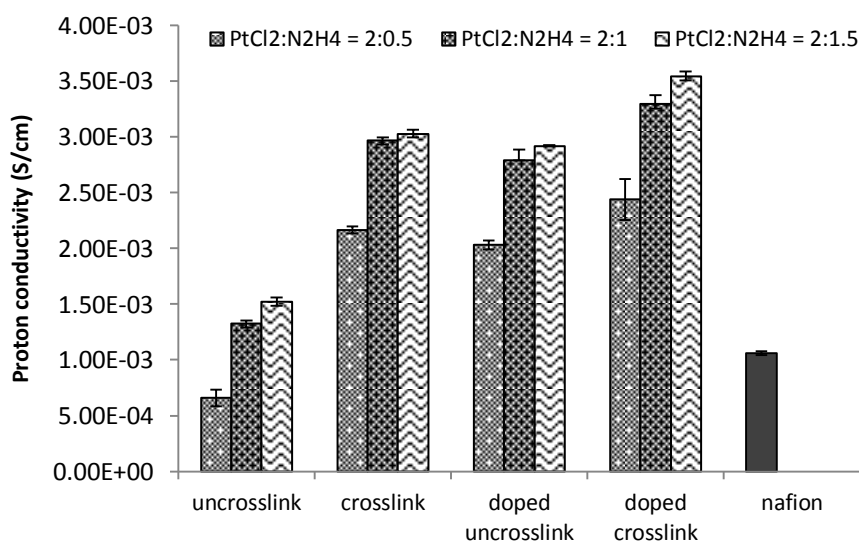
ชนิดเมมเบรนไคโตซาน	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ค่าการนำโปรตอน (S/cm)
แบบไม่เชื่อมขวาง	30	120	$1.46 \times 10^{-3} \pm 1.22 \times 10^{-4}$
	40	120	$1.30 \times 10^{-3} \pm 7.84 \times 10^{-5}$
	50	120	$1.37 \times 10^{-3} \pm 2.11 \times 10^{-3}$
	60	90	$1.51 \times 10^{-3} \pm 3.35 \times 10^{-5}$
แบบเชื่อมขวาง	30	120	$2.10 \times 10^{-3} \pm 1.12 \times 10^{-4}$
	40	120	$1.92 \times 10^{-3} \pm 2.17 \times 10^{-4}$
	50	120	$2.11 \times 10^{-3} \pm 3.22 \times 10^{-4}$
	60	90	$2.87 \times 10^{-3} \pm 2.39 \times 10^{-4}$
แบบโดปของแบบไม่เชื่อมขวาง	30	120	$2.78 \times 10^{-3} \pm 9.60 \times 10^{-5}$
	40	120	$2.00 \times 10^{-3} \pm 2.90 \times 10^{-5}$
	50	120	$2.16 \times 10^{-3} \pm 6.17 \times 10^{-5}$
	60	90	$2.91 \times 10^{-3} \pm 1.71 \times 10^{-4}$
แบบโดปของแบบเชื่อมขวาง	30	120	$3.01 \times 10^{-3} \pm 1.61 \times 10^{-4}$
	40	120	$2.37 \times 10^{-3} \pm 2.11 \times 10^{-4}$
	50	120	$2.73 \times 10^{-3} \pm 1.34 \times 10^{-4}$
	60	90	$3.29 \times 10^{-3} \pm 2.24 \times 10^{-4}$



รูปที่ 4.9 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนก่อนและหลังเคลือบ

4.2.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยมวลแพลทินัมกับไฮโดรราซีน

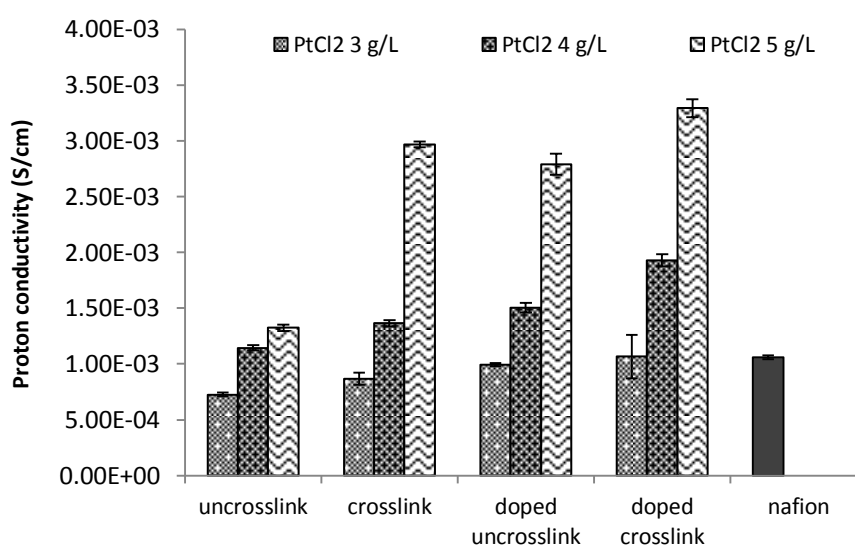
ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮโดรราซีนที่ปริมาณ $PtCl_2$, Na_2EDTA และ ปริมาณสารละลายแอมโมเนีย เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร, 40.1 กรัม/ลิตร และ 198 มิลลิลิตร/ลิตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมต้องไม่น้อยกว่าตามอัตราส่วนสัมพัทธ์ (Stoichiometric ratio) เมื่อคิดประสิทธิภาพการรีดักชันของไฮโดรราซีนเป็น 100% สมการที่ (2.4) คือ 2 : 1 แต่ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการรีดักชันของไฮโดรราซีนน้อยกว่า 100% ดังนั้น การเพิ่มปริมาณไฮโดรราซีนทำให้เมมเบรนทุกชนิดมีค่าการนำโปรตอนสูงขึ้น ทำให้ที่อัตราส่วนโดยมวลของ แพลทินัมกับไฮโดรราซีนเท่ากับ 2 : 1.5 ให้ ค่าการนำโปรตอนสูงสุด แต่ยังเห็นว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 2 : 1 เพราะค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเทียบกับการเพิ่มปริมาณสารไฮโดรราซีนซึ่งเป็น สารอันตราย (health hazard = 3, reactivity hazard = 2, fire hazard = 2) นอกจากนั้นยัง พบว่าการเคลือบแพลทินัมแบบไม่ใช้ไฟฟ้านี้ไม่เหมาะกับเมมเบรนแบบโตนทั้งแบบไม่เชื่อมขวาง และ แบบเชื่อมขวาง เพราะให้ค่าการนำโปรตอนสูงกว่าก่อนเคลือบเพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมมเบรนแบบโตนของแบบเชื่อมขวางไม่มีความแตกต่างของค่าการนำโปรตอนในทุกอัตราส่วน โดยคาดว่า น่าจะเกิดจากการสะท้อนของสารละลายกรดซัลฟิวริกในเมมเบรนกับสารละลายแอมโมเนียใน สารละลายเคลือบ แต่จะเหมาะกับเมมเบรนแบบเชื่อมขวางที่ไม่ได้โตนเพราะมีหมู่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สำหรับการจับกับไอออนแพลทินัมมากขึ้นอีกหนึ่งหมู่ คือหมู่ซัลเฟต นอกเหนือจากหมู่เอมีนในเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวาง



รูปที่ 4. 12 ผลของอัตราส่วนโดยมวลแพลทินัมกับไฮโดรราซีนในสารละลายเคลือบ

4.2.2.2 ผลของปริมาณแพลทินัมคลอไรด์

ผลการศึกษาปริมาณแพลทินัมคลอไรด์ (PtCl_2) ที่อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีน, ปริมาณ Na_2EDTA และ ปริมาณสารละลายแอมโมเนีย เท่ากับ 2 : 1, 40.1 กรัม/ลิตร และ 198 มิลลิลิตร/ลิตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมต้องไม่น้อยกว่าตามอัตราส่วนสัมพันธ์ (Stoichiometric ratio) คือจะต้องมีปริมาณแพลทินัมคลอไรด์ที่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ ทำให้ที่ปริมาณ PtCl_2 เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร แสดงค่าการนำโปรตอนสูงสุด

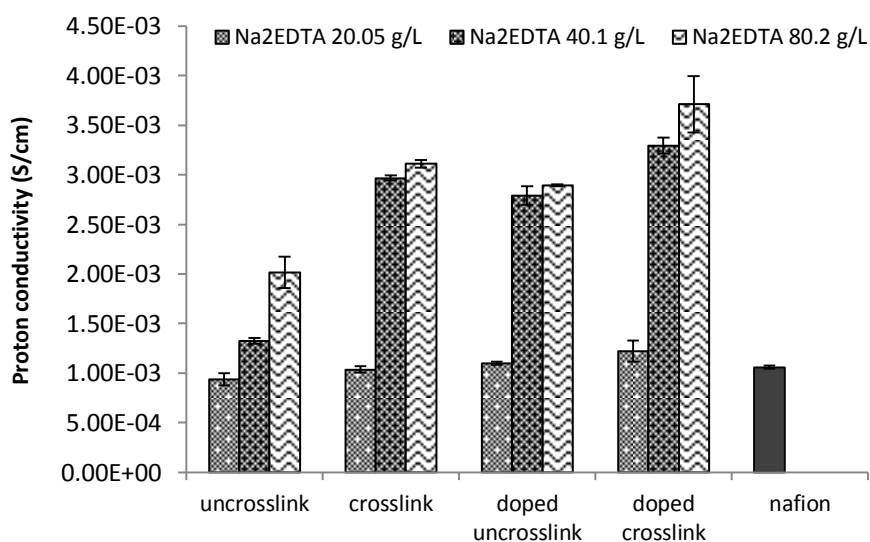


รูปที่ 4. 13 ผลของแพลทินัมคลอไรด์ในสารละลายเคลือบ

4.2.2.3 ผลของปริมาณไดโซเดียมเอทิลีนไดเอมีนเทตระแอะซีเตต

สารไดโซเดียมเอทิลีนไดเอมีนเทตระแอะซีเตต (Na_2EDTA) ใช้เป็นสารเพิ่มความเสถียรในอ่างสารละลายเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดการสลายตัวขึ้นเอง (Spontaneous decomposition) สามารถรวมตัวกับไอออนโลหะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนคีเลตคงตัวที่ละลายน้ำได้ (Chelated soluble complex) จากผลการศึกษาปริมาณ Na_2EDTA ที่ปริมาณ PtCl_2 , อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีน และปริมาณสารละลายแอมโมเนีย เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร, 2 : 1 และ 198 มิลลิลิตร/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 พบว่าค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนโคโตะซานเคลือบแพลทินัมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Na_2EDTA ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการนำโปรตอนสูงสุดที่ปริมาณเท่ากับ 80.2 ± 0.005 กรัม/ลิตร ซึ่งแสดงว่าสารละลายเคลือบต้องการอัตราส่วนโดยมวลของสาร Na_2EDTA ต่อปริมาณไอออนโลหะ มากกว่า 1 : 1 แต่การใช้ปริมาณมากเกินไปกว่า 80.2 กรัม/ลิตร

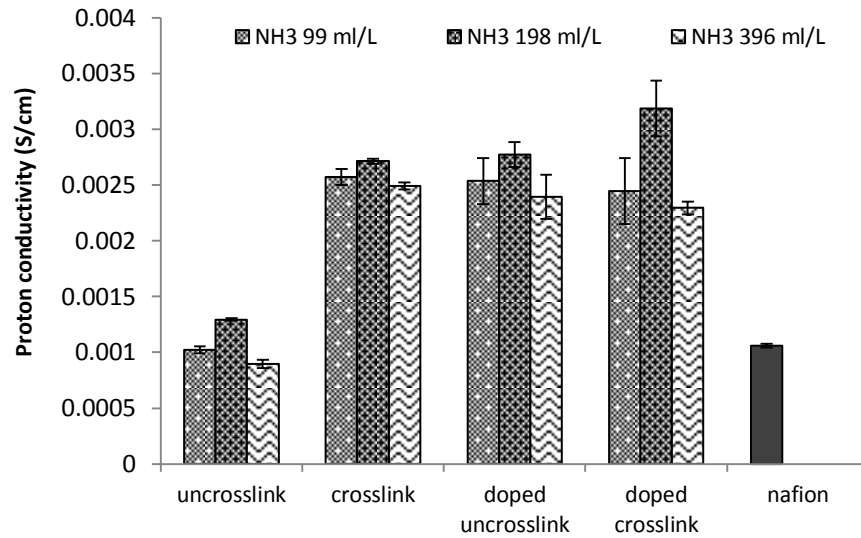
ไม่น่าจะทำให้ได้ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นมากนัก โดยสังเกตจากค่าการนำโปรตอนที่ปริมาณการใช้ เท่ากับ 40.1 และ 80.2 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4. 14 ผลของปริมาณสาร Na₂EDTA ในสารละลายเคลือบ

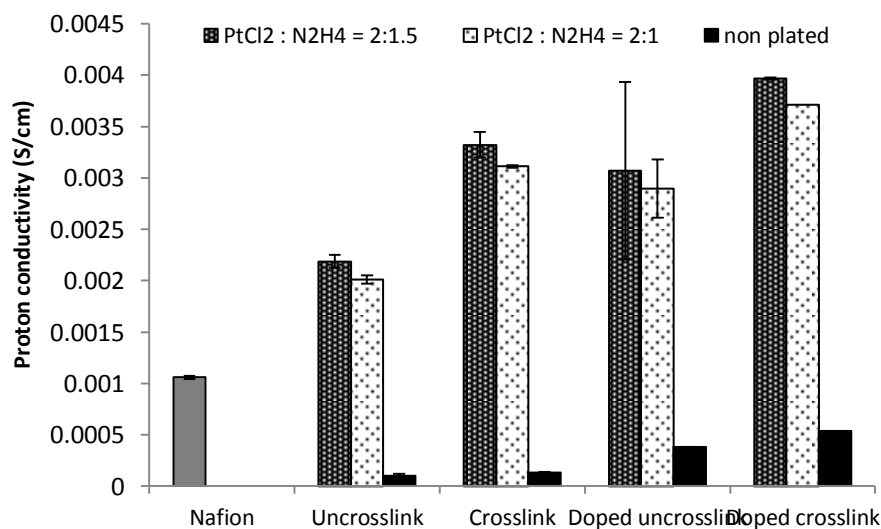
4.2.2.4 ผลของปริมาณสารละลายแอมโมเนีย

ถึงแม้ในสารละลายเคลือบที่ใช้ไฮดราซีนจำเป็นต้องมีสารละลายแอมโมเนียที่มากเกินไป เพื่อทำให้สารละลายเคลือบมีเสถียรภาพ คงรักษาระดับพีเอชของสารละลาย และทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน [23] แต่จากผลการศึกษาการเคลือบแพลทินัมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าลงบนเมมเบรนไคโตซานที่ปริมาณ PtCl₂, อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีน และปริมาณ Na₂EDTA เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร, 2 : 1 และ 40.1 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ในรูปที่ 4.15 แสดงว่าปริมาณสารละลายแอมโมเนียที่เหมาะสม เท่ากับ 198±0.5 มิลลิลิตร/ลิตร



รูปที่ 4. 15 ผลของปริมาณสารละลายแอมโมเนียในสารละลายเคลือบ

สรุปสถานะขององค์ประกอบสารละลายเคลือบที่เหมาะสม คือ ปริมาณ PtCl₂ อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีน ปริมาณ Na₂EDTA และปริมาณสารละลายแอมโมเนีย เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร, 2 : 1, 80.2 กรัม/ลิตร และ 198 มิลลิลิตร/ลิตร ตามลำดับ แต่ในการศึกษาส่วนต่อไปจะใช้สภาวะการเคลือบที่อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีน เท่ากับ 2 : 1.5 ซึ่งให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุด รูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.3 แสดงเปรียบเทียบค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนแต่ละชนิดก่อนและหลังเคลือบแพลทินัมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่ทั้ง 2 อัตราส่วน



รูปที่ 4. 16 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนโคโตซานก่อนและหลังเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

ตารางที่ 4. 4 สรุปค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานก่อนและหลังการเคลือบ หน่วย : S/cm

ชนิดเมมเบรน	ค่าก่อนเคลือบ	ค่าหลังเคลือบที่อัตราส่วนโดยมวล ของแพลทินัมกับไฮดราซีน	
		2 : 1	2 : 1.5
Nafion117	1.06×10^{-3} $\pm 1.64 \times 10^{-5}$		
ไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง	1.04×10^{-4} $\pm 1.61 \times 10^{-6}$	2.01×10^{-3} $\pm 1.59 \times 10^{-4}$	2.19×10^{-3} $\pm 6.34 \times 10^{-5}$
ไคโตซานแบบเชื่อมขวาง	1.31×10^{-4} $\pm 1.63 \times 10^{-5}$	3.11×10^{-3} $\pm 3.96 \times 10^{-5}$	3.32×10^{-3} $\pm 1.24 \times 10^{-4}$
ไคโตซานแบบโดปของแบบไม่ เชื่อมขวาง	3.81×10^{-4} $\pm 5.96 \times 10^{-6}$	2.89×10^{-3} $\pm 1.16 \times 10^{-5}$	3.07×10^{-3} $\pm 8.62 \times 10^{-4}$
ไคโตซานแบบโดปของแบบ เชื่อมขวาง	5.38×10^{-4} $\pm 4.55 \times 10^{-6}$	3.71×10^{-3} $\pm 2.84 \times 10^{-4}$	3.97×10^{-3} $\pm 7.99 \times 10^{-6}$

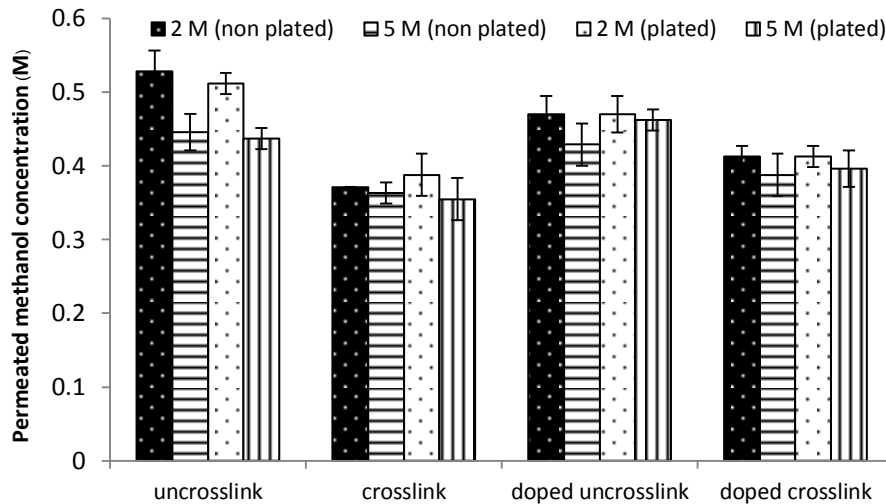
หมายเหตุ : สภาวะการเคลือบที่ 60°C , 90 นาที, $\text{PtCl}_2 = 5 \text{ g/L}$, $\text{Na}_2\text{EDTA} = 80.2 \text{ g/L}$,

$\text{NH}_3 \text{ solution} = 198 \text{ mL/L}$

4.3 ผลการศึกษาสมบัติของเมมเบรนหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

4.3.1 ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล

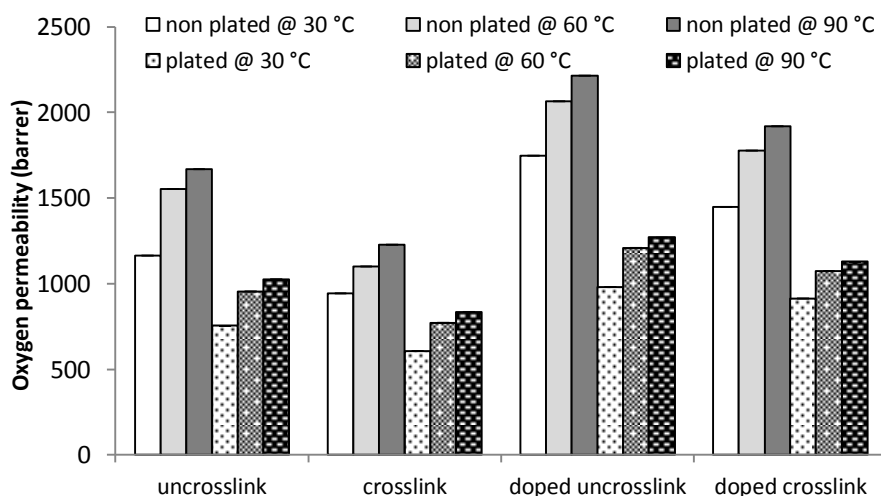
รูปที่ 4.17 แสดงค่าการแพร่ผ่านเมมเบรนไคโตซานของเมทานอล ณ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และความดัน 100 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งพบว่าเกิดการแพร่ผ่านที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2 และ 5 โมลาร์ เท่านั้น และการเคลือบแพลทินัมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที ปริมาณ PtCl_2 เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีนเท่ากับ 2 : 1.5 ปริมาณ Na_2EDTA เท่ากับ 80.2 กรัม/ลิตร และปริมาณสารละลายแอมโมเนียเท่ากับ 198 มิลลิลิตร/ลิตร ไม่ได้ทำให้สมบัติการแพร่ผ่านเมทานอลเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยมีค่าความเข้มข้นของเพอร์มิเอตเมทานอลอยู่ใน ช่วง 0.4 - 0.5 โมลาร์ ที่ทั้งสองความเข้มข้นทั้งก่อนและหลังเคลือบ



รูปที่ 4. 17 ค่าการแพร่ผ่านเมมเบรนของเมทานอลก่อนและหลังการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

4.3.2 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

รูปที่ 4.18 แสดงค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบก่อนและหลังการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที ปริมาณ $PtCl_2$ เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีนเท่ากับ 2 : 1.5 ปริมาณ Na_2EDTA เท่ากับ 80.2 กรัม/ลิตร และปริมาณสารละลายแอมโมเนียเท่ากับ 198 มิลลิลิตร/ลิตร พบว่าเมมเบรนทุกชนิดแสดงค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ต่ำกว่าก่อนเคลือบที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกัน เป็นผลดีต่อการนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีลำดับความสามารถในการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊สออกซิเจนจากน้อยไปมาก คือ แบบเชื่อมขวาง < แบบไม่เชื่อมขวาง < แบบโตะของแบบเชื่อมขวาง < แบบโตะของแบบไม่เชื่อมขวาง

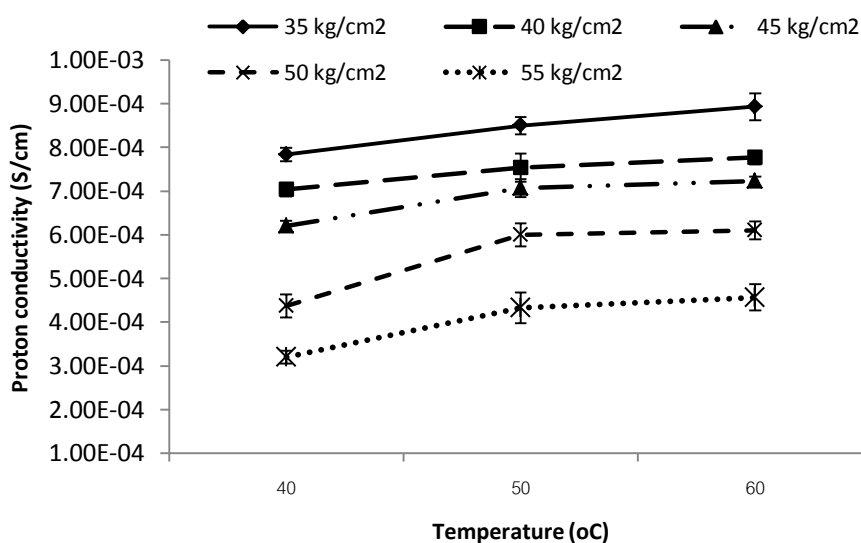


รูปที่ 4. 18 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนก่อนและหลังการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

4.4 ผลการศึกษาหาสภาวะในการเตรียม Membrane Electrode Assembly (MEA)

ในส่วนนี้เลือกใช้เมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบเชื่อมขวางที่เคลือบแพลทินัมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที ปริมาณ PtCl_2 เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีน เท่ากับ 2 : 1.5 ปริมาณ Na_2EDTA เท่ากับ 80.2 กรัม/ลิตร และปริมาณสารละลายแอมโมเนีย เท่ากับ 198 มิลลิลิตร/ลิตร ซึ่งมีค่าการนำโปรตอนสูงสุดเท่ากับ $3.97 \times 10^{-3} \pm 7.99 \times 10^{-6}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร มาเตรียมเป็นหน่วยเมมเบรนและอิเล็กโทรด (MEA) เพื่อนำไปทดสอบในเซลล์เดี่ยวต่อไป โดยในการศึกษาหาสภาวะการเตรียม MEA ที่เหมาะสมนี้ สนใจตัวแปรในการอัดร้อน คือ อุณหภูมิและความดันต่อค่าการนำโปรตอน ได้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่า ที่ความดันการอัดเท่ากับ 35 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าการนำโปรตอนของ MEA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจาก 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส และเป็นระดับความดันการอัดที่เหมาะสมสำหรับเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบเชื่อมขวาง เพราะค่าการนำโปรตอนลดลงเมื่อเพิ่มความดันการอัดให้สูงขึ้นที่ทุกระดับอุณหภูมิที่ศึกษา และเมื่อเพิ่มระดับความดันการอัดสูงกว่า 45 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีค่าอุณหภูมิการอัดที่เหมาะสมเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส การที่ไม่สามารถใช้สภาวะที่รุนแรงกับเมมเบรนไคโตซานได้นั้น น่าจะเนื่องจากความเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพของไคโตซาน และเมมเบรนที่เลือกนำมาเตรียมเป็น MEA เป็นชนิดแบบโตนซึ่งอยู่ในสภาพเปียกมีความแข็งแรงน้อยกว่าในสภาพตั้งเดิมดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1.1

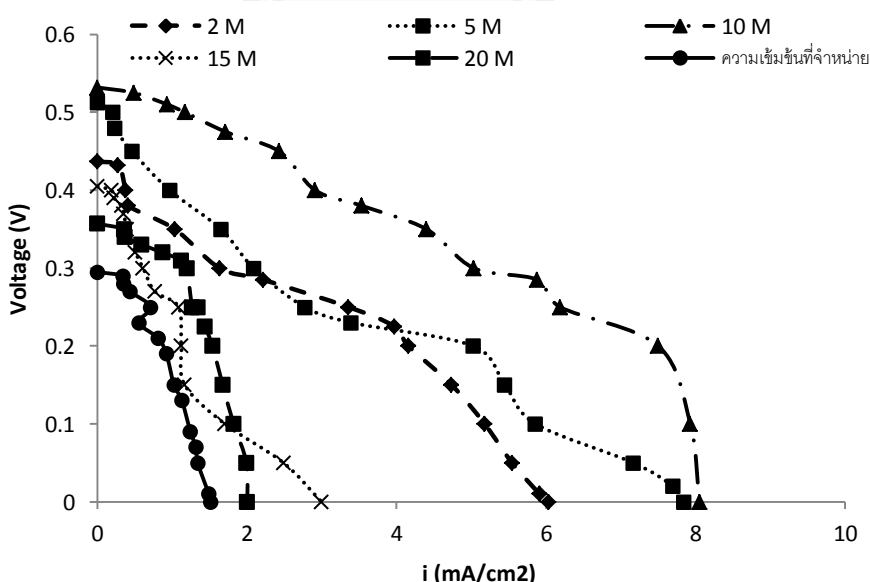
ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม MEA จากเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบเชื่อมขวาง คือ การอัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 35 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เป็น เวลา 2 นาที



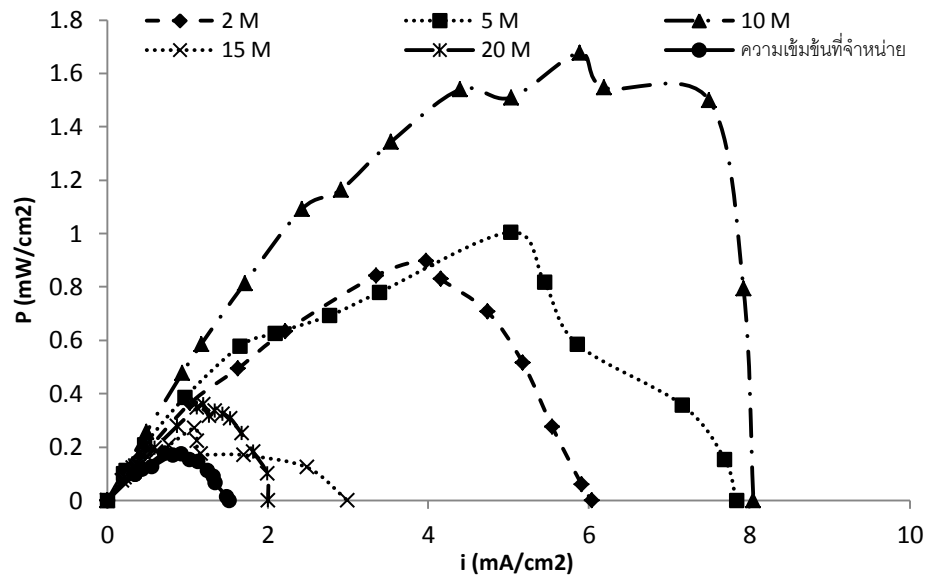
รูปที่ 4. 19 ผลการศึกษาหาสภาวะการเตรียม MEA จากเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบเชื่อมขวาง

4.5 ผลการทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว

รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงกราฟโพลาริเซชันและกราฟความหนาแน่นกำลัง ตามลำดับของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบมีการเชื่อมขวาง ที่ความเข้มข้นเมทานอล 2, 5, 10, 15, 20 โมลาร์ และความเข้มข้นสูงสุดที่กำหนดพบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.437 เป็น 0.513 และ 0.532 โวลต์ เมื่อความเข้มข้นของเมทานอลเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 5 และ 10 โมลาร์ ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุดที่ความเข้มข้นดังกล่าวเท่ากับ $0.9 \pm 3.1 \times 10^{-3}$, $1.0 \pm 9.5 \times 10^{-3}$ และ $1.7 \pm 1.2 \times 10^{-3}$ มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงว่าเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานสามารถใช้ได้กับความเข้มข้นเมทานอลสูง ๆ จนถึง 10 โมลาร์ ต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงเชิงพาณิชย์ที่เตรียมจากเมมเบรนแนฟิออนที่ใช้กับความเข้มข้นต่ำ ๆ 1 ถึง 3 โมลาร์ อย่างไรก็ตาม สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบมีการเชื่อมขวางนี้ยังต่ำกว่าสมรรถนะของเซลล์ที่เตรียมจากเมมเบรนแนฟิออน 117 ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุดเท่ากับ 3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเข้มข้นเมทานอล 2 โมลาร์ (เตรียม MEA จากเมมเบรนแนฟิออน 117 ด้วยการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ commercial electrode เป็นกระดาษคาร์บอนที่มีปริมาณแพลทินัม 1.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งผลิตจาก Toray Industries, Inc.)



รูปที่ 4. 20 กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบมีการเชื่อมขวาง ที่ค่าความเข้มข้นเมทานอลต่าง ๆ



รูปที่ 4. 21 กราฟความหนาแน่นกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานแบบโดปของแบบมีการเชื่อมขวาง ที่ค่าความเข้มข้นเมทานอลต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) ลักษณะสมบัติของเมมเบรนไคโตซานก่อนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

พารามิเตอร์	ชนิดเมมเบรน				
	แบบไม่เชื่อมขวาง	แบบเชื่อมขวาง	แบบโศปของแบบไม่เชื่อมขวาง	แบบโศปของแบบเชื่อมขวาง	แนฟิออน 117
ความสามารถทนต่อแรงดึง (MPa)	74.1±3.7	83.6±0.2	38.3±1.1	42.7±1.3	29.5±0.6
ร้อยละการยืด	8.8±1.1	10.3±0.5	4.0±0.1	5.3±0.2	352.5±2.1
ร้อยละการดูดซับน้ำ	54.32±0.8	71.15±1.4	64.68±0.9	74.59±2.0	23.1±1.2
ร้อยละการดูดซับเมทานอล	15.4±0.7	5.07±0.4	27.14±0.7	2.55±0.6	74.5±2.2
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาในน้ำ	39.69±1.2	70.12±0.6	60.06±0.6	74.38±1.2	6.7±0.3

พารามิเตอร์	ชนิดเมมเบรน				
	แบบไม่เชื่อมขวาง	แบบเชื่อมขวาง	แบบโศปของแบบไม่เชื่อมขวาง	แบบโศปของแบบเชื่อมขวาง	แนฟิออน 117
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาในเมทานอล	5.86±0.7	3.45±0.9	10.06±0.7	1.81±0.1	-
ค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนที่ 30 °C (Barrers)	1162.75±1.4×10 ⁻⁹	942.10±3.4×10 ⁻⁹	1748.00±4.7×10 ⁻⁹	1447.68±5.2×10 ⁻⁸	4509.81±1.4×10 ⁻⁸
ค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนที่ 60 °C (Barrers)	1554.14±3.0×10 ⁻⁹	1099.83±4.3×10 ⁻⁹	2063.15±6.3×10 ⁻⁹	1778.54±2.9×10 ⁻⁹	4980.64±4.2×10 ⁻⁸
ค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนที่ 90 °C (Barrers)	1668.59±2.9×10 ⁻⁹	1225.55±5.3×10 ⁻⁹	2214.48±5.0×10 ⁻⁹	1919.86±8.2×10 ⁻⁹	5109.19±1.6×10 ⁻⁸
ค่าการนำโปรตอนแนวภาคตัดขวาง (S/cm)	1.04×10 ⁻⁴ ±1.6×10 ⁻⁶	1.3 ×10 ⁻⁴ ±1.6×10 ⁻⁵	3.8×10 ⁻⁴ ±5.9×10 ⁻⁶	5.4×10 ⁻⁴ ±4.6×10 ⁻⁶	1.06×10 ⁻³ ±1.6×10 ⁻⁵

- 2) สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนเมมเบรนไคโตซานโดยตรง คือ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที ปริมาณ PtCl_2 เท่ากับ 5 กรัม/ลิตร อัตราส่วนโดยมวลของแพลทินัมกับไฮดราซีน เท่ากับ 2 : 1.5 ปริมาณ Na_2EDTA เท่ากับ 80.2 กรัม/ลิตร และปริมาณสารละลายแอมโมเนีย เท่ากับ 198 มิลลิลิตร/ลิตร มีค่าการนำโปรตอนในหน่วยซีเมนส์/เซนติเมตร ดังนี้

ชนิดเมมเบรนไคโตซาน	ค่าก่อนเคลือบ	ค่าหลังเคลือบ
แบบไม่เชื่อมขวาง	$1.04 \times 10^{-4} \pm 1.61 \times 10^{-6}$	$2.19 \times 10^{-3} \pm 6.34 \times 10^{-5}$
แบบเชื่อมขวาง	$1.31 \times 10^{-4} \pm 1.63 \times 10^{-5}$	$3.32 \times 10^{-3} \pm 1.24 \times 10^{-4}$
แบบโพลของแบบไม่เชื่อมขวาง	$3.81 \times 10^{-4} \pm 5.96 \times 10^{-6}$	$3.07 \times 10^{-3} \pm 8.62 \times 10^{-4}$
แบบโพลของแบบเชื่อมขวาง	$5.38 \times 10^{-4} \pm 4.55 \times 10^{-6}$	$3.97 \times 10^{-3} \pm 7.99 \times 10^{-6}$

- 3) เมมเบรนไคโตซานทุกชนิดยอมให้เมทานอลที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 5 โมลาร์ แพร่ผ่านได้ โดยมีค่าความเข้มข้นของเพอร์มิเอตเมทานอลอยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 โมลาร์ ทั้งก่อนและหลังเคลือบ
- 4) ค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเป็น ดังนี้

ชนิดเมมเบรนไคโตซาน	O_2 permeability (Barrers)		
	ที่ 30 °C	ที่ 60 °C	ที่ 90 °C
แบบไม่เชื่อมขวาง	$753.43 \pm 1.0 \times 10^{-8}$	$954.45 \pm 1.3 \times 10^{-8}$	$1024.73 \pm 1.5 \times 10^{-8}$
แบบเชื่อมขวาง	$605.07 \pm 1.5 \times 10^{-9}$	$771.18 \pm 2.7 \times 10^{-9}$	$834.33 \pm 3.1 \times 10^{-9}$
แบบโพลของแบบไม่เชื่อมขวาง	$979.68 \pm 4.5 \times 10^{-10}$	$1207.53 \pm 2.4 \times 10^{-9}$	$1269.36 \pm 2.3 \times 10^{-9}$
แบบโพลของแบบเชื่อมขวาง	$912.90 \pm 3.5 \times 10^{-10}$	$1074.07 \pm 1.6 \times 10^{-9}$	$1127.78 \pm 2.9 \times 10^{-9}$

- 5) สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม MEA คือการอัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็น เวลา 2 นาที

- 6) เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดเมทานอลโดยตรงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบมีการเชื่อมขวาง ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดเท่ากับ 0.532 โวลต์ ที่ความเข้มข้นเมทานอล 10 โมลาร์ มีค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุดเท่ากับ $1.7 \pm 1.2 \times 10^{-3}$ มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาเมมเบรนไคโตซานชนิดที่น่าสนใจมากกว่าคือแบบเชื่อมขวาง
- 2) ศึกษาอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซาน เนื่องจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ สามารถเกิดการย่อยสลายได้ง่าย
- 3) ปรับปรุงเทคนิคการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเทคนิคอื่น
- 4) วิเคราะห์ปริมาณแพลทินัมที่เคลือบติดบนพื้นผิวของเมมเบรน



รายการอ้างอิง

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ก. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) 2555 [cited 2555 2 กรกฎาคม]; Available from: : www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp12_21.
2. Keith Scott , L.X., *Direct Methanol Fuel Cells*. Advances in Chemical Engineering, 2012. **41**: p. 145–196.
3. เชยอุบล, ศ., เมมเบรนฐานไคโตซาน/ซีโพลต์เคลือบแพลเลเดียมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม, in ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์. 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. ตรีสุวรรณ, จ., การเคลือบแพลทินัมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าบนเมมเบรนไคโตซานสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม, in ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์. 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. อังคตรีรัตน์, อ., ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อสมรรถนะของแพลทินัม/ซีโพลต์-ไคโตซานเมมเบรนในเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม, in ภาควิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์. 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. Wieckowski, A., *Interfacial Electrochemistry: Theory, Experiment, and Applications*. 1999: Marcel Dekker, Inc.
7. O'hayre, R., Cha S., Colella, W. and Prinz B. F. , *Fuel cell fundamentals*. 2009, New York: John Wiley & Son.
8. Hacquard, A., *Improving and Understanding Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) Performance*, in *Department of Chemical Engineering*, . 2005, Worcester Polytechnic Institute. p. 18.
9. Wikipedia. *Nafion*. 2557 [cited 2557 2 พฤศจิกายน]; Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nafion>.
10. Barbir, F., *PEM Fuel Cells Theory and Practice. Chapter 4 Main Cell Components, Material Properties, and Processes*. 2013: Elsevier Inc. .
11. Philip, A.S., P.E., *Paint and Coatings: Applications and Corrosion Resistance*. 2006: Taylor & Francis Group, LLC.
12. Mallory G.O. and Hajdu, J.B., *Electroless Plating: Fundamentals and Applications*. 1990: American Electroplaters and Surface Finishers Society.

13. Wikipedia. *Electroless nickel plating*. 2557 [cited 2557 2 พฤศจิกายน]; Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Electroless_nickel_plating.
14. Hasani-Sadrabadi, M.M.a.o., *A high-performance chitosan-based double layer proton exchange membrane with reduced methanol crossover*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011. **36**: p. 6105 - 6111.
15. Osifo, P.O.a.M., A., *Characterization of direct methanol fuel cell (DMFC) applications with H2SO4 modified chitosan membrane*. Journal of Power Sources, 2010. **195**: p. 4915 - 4922.
16. Dashtimoghadam, E.H.-S., M. M. and Moaddel, H., *Structural modification of chitosan biopolymer as a novel polyelectrolyte membrane for power generation*. Polymers Advance Technologies, 2010. **21**: p. 726 - 734.
17. Xiang, Y.Y., M., Guo, Z. and Cui, Z., *Alternatively chitosan sulfate blending membrane as methanol-blocking polymer electrolyte membrane for direct methanol fuel*. Journal of Membrane Science, 2009. **337**: p. 318 - 323.
18. Cui, Z.X., Y. , Si, J. , Yang, M. , Zhang, Q. and Zhang, T., *Ionic interactions between sulfuric acid and chitosan membranes*. Carbohydrate Polymers, 2008. **73**: p. 111 - 116.
19. DuPont. *DuPont Fuel Cells*. 2557 [cited 2551 2 พฤศจิกายน].
20. Jung, H.-Y.a.K., J.W., *Role of the glass transition temperature of Nafion117 membrane in the preparation of the membrane electrode assembly in a direct methanol fuel cell (DMFC)*. International Journal Oh Hydrogen Energy, 2012. **37**: p. 12580 - 12585.
21. Sakurai, K.a.o., *Glass transition temperature of chitosan and miscibility of chitosan/poly(N-vinyl pyrrolidone) blends*. Polymers, 2000. **41**: p. 7051 - 7056.
22. Corti, H.R.a.G., E.R., *Direct Alcohol Fuel Cells: Materials, Performance, Durability and Applications*. Membrane for Direct Alcohol Fuel Cells. 2014.
23. Cheng, Y.S.a.Y., K.L., *Effects of electroless plating chemistry on the synthesis of palladium membranes*. Journal of Membrane Science, 2001. **182**: p. 195 - 203.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

1. ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงและร้อยละการยืด

ตารางที่ ก-1 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงและร้อยละการยืดของเมมเบรนไคโตซานเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ความสามารถในการทนต่อแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืด
Nafion 117	29.5±0.6	352.5±2.1
Uncrosslink chitosan	74.1±3.7	8.8±1.1
Crosslink chitosan	83.6±0.2	10.4±0.53
Doped uncrosslink chitosan	38.3±1.1	4.0±0.2
Doped crosslink chitosan	42.7±1.3	5.3±0.2

2. ค่าร้อยละการดูดซับน้ำและร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

ตารางที่ ก-2 ค่าร้อยละการดูดซับน้ำและร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนไคโตซานเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ร้อยละการดูดซับน้ำ	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา
Nafion 117	23.1±1.2	6.7±0.3
Uncrosslink chitosan	54.32±0.8	39.7±1.2
Crosslink chitosan	71.11±1.4	70.1±0.6
Doped uncrosslink chitosan	64.68±0.9	60.1±0.6
Doped crosslink chitosan	74.59±2.0	74.4±1.2

ตารางที่ ก-3 ค่าร้อยละการดูดซับเมทานอลและร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนไคโตซานเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ร้อยละการดูดซับเมทานอล	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา
Nafion 117	74.50±2.2	48.9±0.8
Uncrosslink chitosan	15.4±0.7	5.9±0.7
Crosslink chitosan	5.07±0.3	3.4±0.9
Doped uncrosslink chitosan	27.14±0.7	10.1±0.7
Doped crosslink chitosan	2.55±0.6	1.8±0.0

3. ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

ตารางที่ ก-4 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนไคโตซานเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (แบเรอร์)
Nafion 117	4509.8±1.4×10 ⁻⁹
Uncrosslink chitosan	1162.8±1.4×10 ⁻⁹
Crosslink chitosan	942.0±2.4×10 ⁻⁹
Doped uncrosslink chitosan	1748.0±4.7×10 ⁻⁹
Doped crosslink chitosan	1447.7±5.2×10 ⁻⁹

ตารางที่ ก-5 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนไคโตซานเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (แบเรอร์)
Nafion 117	4980.6±4.2×10 ⁻⁹
Uncrosslink chitosan	1554.1±3.0×10 ⁻⁹
Crosslink chitosan	1099.8±4.3×10 ⁻⁹
Doped uncrosslink chitosan	2063.2±6.3×10 ⁻⁹
Doped crosslink chitosan	1778.5±2.9×10 ⁻⁹

ตารางที่ ก-6 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนไคโตซานเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ แนนฟิออน 117 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (แบเรอร์)
Nafion 117	$5109.2 \pm 1.6 \times 10^{-9}$
Uncrosslink chitosan	$1668.6 \pm 2.9 \times 10^{-9}$
Crosslink chitosan	$1225.6 \pm 5.3 \times 10^{-9}$
Doped uncrosslink chitosan	$2214.5 \pm 5.0 \times 10^{-9}$
Doped crosslink chitosan	$1919.9 \pm 8.2 \times 10^{-9}$

4. ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล

ตารางที่ ก-7 ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลของเมมเบรนไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเมทานอลขาเข้า 2 โมลาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล (โมลาร์)
Uncrosslink chitosan	$0.53 \pm 2.9 \times 10^{-2}$
Crosslink chitosan	0.37 ± 0
Doped uncrosslink chitosan	$0.47 \pm 2.5 \times 10^{-2}$
Doped crosslink chitosan	$0.41 \pm 1.4 \times 10^{-2}$

ตารางที่ ก-8 ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลของเมมเบรนไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเมทานอลขาเข้า 5 โมลาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล (โมลาร์)
Uncrosslink chitosan	$0.45 \pm 2.5 \times 10^{-2}$
Crosslink chitosan	$0.36 \pm 1.4 \times 10^{-2}$
Doped uncrosslink chitosan	$0.43 \pm 2.9 \times 10^{-2}$
Doped crosslink chitosan	$0.39 \pm 2.9 \times 10^{-2}$

5. ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซาน

ตารางที่ ก-9 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117 ที่อุณหภูมิห้อง

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Uncrosslink chitosan	$1.04 \times 10^{-4} \pm 1.6 \times 10^{-6}$
Crosslink chitosan	$1.31 \times 10^{-4} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Doped uncrosslink chitosan	$3.81 \times 10^{-4} \pm 6.0 \times 10^{-6}$
Doped crosslink chitosan	$5.38 \times 10^{-4} \pm 4.55 \times 10^{-6}$

6. ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัม

ตารางที่ ก-10 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$6.56 \times 10^{-4} \pm 3.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.30 \times 10^{-3} \pm 9.7 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.72 \times 10^{-4} \pm 2.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.76 \times 10^{-4} \pm 3.8 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-11 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$7.60 \times 10^{-4} \pm 2.3 \times 10^{-8}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.51 \times 10^{-3} \pm 1.4 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.78 \times 10^{-3} \pm 6.5 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.80 \times 10^{-3} \pm 5.3 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-12 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.46 \times 10^{-4} \pm 1.2 \times 10^{-4}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.10 \times 10^{-3} \pm 1.1 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.78 \times 10^{-3} \pm 9.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.01 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ก-13 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$9.53 \times 10^{-4} \pm 5.1 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.73 \times 10^{-3} \pm 1.0 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.80 \times 10^{-3} \pm 5.8 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.31 \times 10^{-3} \pm 1.0 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ก-14 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$6.95 \times 10^{-4} \pm 3.0 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.2 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.31 \times 10^{-3} \pm 3.0 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.67 \times 10^{-3} \pm 4.2 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-15 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$8.94 \times 10^{-4} \pm 6.5 \times 10^{-6}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.21 \times 10^{-3} \pm 7.6 \times 10^{-6}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.59 \times 10^{-3} \pm 6.7 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.73 \times 10^{-3} \pm 1.5 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ก-16 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.30 \times 10^{-3} \pm 7.8 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.92 \times 10^{-3} \pm 2.2 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.00 \times 10^{-3} \pm 2.9 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.36 \times 10^{-3} \pm 2.1 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ก-17 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.09 \times 10^{-3} \pm 8.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.51 \times 10^{-3} \pm 1.9 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.71 \times 10^{-3} \pm 3.7 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.02 \times 10^{-3} \pm 1.3 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ก-18 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$7.07 \times 10^{-4} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$9.62 \times 10^{-3} \pm 4.1 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.80 \times 10^{-3} \pm 6.7 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.75 \times 10^{-3} \pm 4.1 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-19 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$9.07 \times 10^{-4} \pm 2.3 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.12 \times 10^{-3} \pm 9.4 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.85 \times 10^{-3} \pm 3.1 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.43 \times 10^{-3} \pm 9.8 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-20 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.37 \times 10^{-4} \pm 3.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.49 \times 10^{-3} \pm 3.8 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.16 \times 10^{-3} \pm 6.2 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.73 \times 10^{-3} \pm 1.3 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ก-21 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.30 \times 10^{-3} \pm 4.2 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.74 \times 10^{-3} \pm 5.7 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.93 \times 10^{-3} \pm 4.4 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.60 \times 10^{-3} \pm 9.7 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-22 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$6.40 \times 10^{-4} \pm 1.2 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.45 \times 10^{-3} \pm 1.3 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.67 \times 10^{-3} \pm 9.1 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.70 \times 10^{-3} \pm 6.9 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-23 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.5 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.60 \times 10^{-3} \pm 3.4 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.09 \times 10^{-3} \pm 6.5 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.52 \times 10^{-3} \pm 6.2 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-24 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่ภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.51 \times 10^{-3} \pm 3.4 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.88 \times 10^{-3} \pm 2.4 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.91 \times 10^{-3} \pm 1.7 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.29 \times 10^{-3} \pm 2.2 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ก-25 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที เทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.41 \times 10^{-3} \pm 3.4 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.04 \times 10^{-3} \pm 2.4 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.19 \times 10^{-3} \pm 1.7 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.17 \times 10^{-3} \pm 2.2 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ก-26 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4$ เท่ากับ 2:0.5

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$6.59 \times 10^{-3} \pm 7.5 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.16 \times 10^{-3} \pm 3.4 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.03 \times 10^{-3} \pm 3.9 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.44 \times 10^{-3} \pm 1.8 \times 10^{-5}$

* PtCl_2 5 g/L , Na_2EDTA 40.1 g/L , NH_3 solution 198 mL/L

ตารางที่ ก-27 ค่าการนำโปรตอนที่ถูกหุ้มห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4$ เท่ากับ 2:1

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.32 \times 10^{-3} \pm 2.8 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.97 \times 10^{-3} \pm 2.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.79 \times 10^{-3} \pm 9.3 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.29 \times 10^{-3} \pm 8.0 \times 10^{-5}$

* PtCl_2 5 g/L , Na_2EDTA 40.1 g/L , NH_3 solution 198 mL/L

ตารางที่ ก-28 ค่าการนำโปรตอนที่ถูกหุ้มห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4$ เท่ากับ 2:1.5

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.52 \times 10^{-3} \pm 3.7 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$3.03 \times 10^{-3} \pm 3.4 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.92 \times 10^{-3} \pm 5.4 \times 10^{-6}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.54 \times 10^{-3} \pm 3.9 \times 10^{-5}$

* PtCl_2 5 g/L , Na_2EDTA 40.1 g/L , NH_3 solution 198 mL/L

ตารางที่ ก-29 ค่าการนำโปรตอนที่ถูกหุ้มห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี PtCl_2 เท่ากับ 3 g/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$7.27 \times 10^{-4} \pm 1.7 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$8.67 \times 10^{-4} \pm 5.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$9.95 \times 10^{-4} \pm 1.5 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.07 \times 10^{-3} \pm 1.9 \times 10^{-5}$

* Na_2EDTA 40.1 g/L , NH_3 solution 198 mL/L , $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4 = 2:1$

ตารางที่ ก-30 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี PtCl_2 เท่ากับ 4 g/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.15 \times 10^{-3} \pm 2.5 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.36 \times 10^{-3} \pm 2.7 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.51 \times 10^{-3} \pm 4.4 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.93 \times 10^{-3} \pm 5.4 \times 10^{-5}$

* Na_2EDTA 40.1 g/L , NH_3 solution 198 mL/L , $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4 = 2:1$

ตารางที่ ก-31 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี PtCl_2 เท่ากับ 5 g/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.32 \times 10^{-3} \pm 2.8 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.97 \times 10^{-3} \pm 2.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.79 \times 10^{-3} \pm 9.3 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.29 \times 10^{-3} \pm 8.0 \times 10^{-5}$

* Na_2EDTA 40.1 g/L , NH_3 solution 198 mL/L , $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4 = 2:1$

ตารางที่ ก-32 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี Na_2EDTA เท่ากับ 20.05 g/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$9.37 \times 10^{-4} \pm 6.3 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$1.04 \times 10^{-3} \pm 3.0 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1.10 \times 10^{-3} \pm 1.8 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1.22 \times 10^{-3} \pm 1.1 \times 10^{-4}$

* PtCl_2 5 g/L , NH_3 solution 198 mL/L , $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4 = 2:1$

ตารางที่ ก-33 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี Na₂EDTA เท่ากับ 40.1 g/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.32 \times 10^{-3} \pm 2.8 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.97 \times 10^{-3} \pm 2.6 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.79 \times 10^{-3} \pm 9.3 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.29 \times 10^{-3} \pm 8.0 \times 10^{-4}$

* PtCl₂ 5 g/L , NH₃ solution 198 mL/L , PtCl₂ : N₂H₄ = 2:1

ตารางที่ ก-34 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี Na₂EDTA เท่ากับ 80.2 g/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$2.01 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-4}$
Pt-plated crosslink chitosan	$3.11 \times 10^{-3} \pm 4.0 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.89 \times 10^{-3} \pm 1.2 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.71 \times 10^{-3} \pm 2.8 \times 10^{-4}$

* PtCl₂ 5 g/L , NH₃ solution 198 mL/L , PtCl₂ : N₂H₄ = 2:1

ตารางที่ ก-35 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี NH₃ solution เท่ากับ 99 mL/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.41 \times 10^{-3} \pm 3.4 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.04 \times 10^{-3} \pm 2.4 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.19 \times 10^{-3} \pm 1.7 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.17 \times 10^{-3} \pm 2.2 \times 10^{-4}$

* PtCl₂ 5 g/L , Na₂EDTA 40.1 g/L , PtCl₂ : N₂H₄ = 2:1

ตารางที่ ก-36 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี NH_3 solution เท่ากับ 198 mL/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1.32 \times 10^{-3} \pm 2.8 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.97 \times 10^{-3} \pm 2.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.79 \times 10^{-3} \pm 9.3 \times 10^{-5}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$3.29 \times 10^{-3} \pm 8.0 \times 10^{-5}$

* PtCl_2 5 g/L , Na_2EDTA 40.1 g/L , $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4 = 2:1$

ตารางที่ ก-37 ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมที่สภาวะ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยใช้สารละลายเคลือบที่มี NH_3 solution เท่ากับ 396 mL/L

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
Nafion 117	$1.06 \times 10^{-3} \pm 1.6 \times 10^{-5}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$7.49 \times 10^{-4} \pm 7.3 \times 10^{-5}$
Pt-plated crosslink chitosan	$2.24 \times 10^{-3} \pm 8.7 \times 10^{-6}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$2.21 \times 10^{-3} \pm 2.3 \times 10^{-4}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$2.36 \times 10^{-3} \pm 4.5 \times 10^{-5}$

* PtCl_2 5 g/L , Na_2EDTA 40.1 g/L , $\text{PtCl}_2 : \text{N}_2\text{H}_4 = 2:1$

7. ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัม

ตารางที่ ก-38 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (แบเรอร์)
Nafion 117	$4509.8 \pm 1.4 \times 10^{-9}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$753.4 \pm 1.0 \times 10^{-8}$
Pt-plated crosslink chitosan	$605.1 \pm 1.5 \times 10^{-9}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$979.7 \pm 4.5 \times 10^{-10}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$912. \pm 3.5 \times 10^{-10}$

ตารางที่ ก-39 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (แบเรอร์)
Nafion 117	$4509.8 \pm 1.4 \times 10^{-9}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$954.5 \pm 2.7 \times 10^{-9}$
Pt-plated crosslink chitosan	$771.2 \pm 2.4 \times 10^{-9}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1207.5 \pm 2.4 \times 10^{-9}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1074.1 \pm 1.6 \times 10^{-9}$

ตารางที่ ก-40 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัมเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์แนฟิออน 117 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (แบเรอร์)
Nafion 117	$4509.8 \pm 1.4 \times 10^{-9}$
Pt-plated uncrosslink chitosan	$1024.7 \pm 1.6 \times 10^{-8}$
Pt-plated crosslink chitosan	$834.3 \pm 3.1 \times 10^{-9}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$1269.4 \pm 2.3 \times 10^{-9}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$1127.8 \pm 2.9 \times 10^{-9}$

8. ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัม

ตารางที่ ก-41 ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัม ที่ความเข้มข้นเมทานอลเข้า 2 โมลาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล (โมลาร์)
Pt-plated uncrosslink chitosan	$0.51 \pm 1.4 \times 10^{-2}$
Pt-plated crosslink chitosan	$0.39 \pm 2.9 \times 10^{-2}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$0.44 \pm 1.4 \times 10^{-2}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$0.40 \pm 6.8 \times 10^{-17}$

ตารางที่ ก-42 ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลของเมมเบรนไคโตซานเคลือบแพลทินัม ที่ความเข้มข้นเมทานอลเข้า 5 โมลาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล (โมลาร์)
Pt-plated uncrosslink chitosan	$0.44 \pm 1.5 \times 10^{-2}$
Pt-plated crosslink chitosan	$0.35 \pm 2.9 \times 10^{-2}$
Pt-plated doped uncrosslink chitosan	$0.46 \pm 1.4 \times 10^{-2}$
Pt-plated doped crosslink chitosan	$0.40 \pm 2.5 \times 10^{-2}$

9. ค่าการนำโปรตอนของ MEA ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ก-43 ค่าการนำโปรตอนของ MEA ที่เตรียมจากของเมมเบรนไคโตซานแบบโดปของแบบมีการเชื่อมขวางเคลือบแพลทินัม โดยการอัตราที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความดัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
35	$7.8 \times 10^{-4} \pm 3.1 \times 10^{-5}$
40	$7.1 \times 10^{-4} \pm 1.5 \times 10^{-5}$
45	$6.2 \times 10^{-4} \pm 1.0 \times 10^{-5}$
50	$4.4 \times 10^{-4} \pm 2.1 \times 10^{-5}$
55	$3.2 \times 10^{-4} \pm 3.0 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-44 ค่าการนำโปรตอนของ MEA ที่เตรียมจากของเมมเบรนไคโตซานแบบโดปของแบบมีการเชื่อมขวางเคลือบแพลทินัม โดยการอัตราที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ความดัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
35	$8.5 \times 10^{-4} \pm 2.0 \times 10^{-5}$
40	$7.5 \times 10^{-4} \pm 3.2 \times 10^{-5}$
45	$7.1 \times 10^{-4} \pm 2.1 \times 10^{-5}$
50	$6.0 \times 10^{-4} \pm 2.6 \times 10^{-5}$
55	$4.3 \times 10^{-4} \pm 3.5 \times 10^{-5}$

ตารางที่ ก-45 ค่าการนำโปรตอนของ MEA ที่เตรียมจากของเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบมีการเชื่อมขวางเคลือบแพลทินัม โดยการอัตราที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ความดัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
35	$8.9 \times 10^{-4} \pm 1.5 \times 10^{-5}$
40	$7.8 \times 10^{-4} \pm 1.5 \times 10^{-5}$
45	$7.2 \times 10^{-4} \pm 1.2 \times 10^{-5}$
50	$6.1 \times 10^{-4} \pm 2.6 \times 10^{-5}$
55	$4.6 \times 10^{-4} \pm 1.5 \times 10^{-5}$

10. ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ก-46 ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานแบบโตนของแบบมีการเชื่อมขวางเคลือบแพลทินัมที่ความเข้มข้นเมทานอลต่าง ๆ

ความเข้มข้นเมทานอล (โมลาร์)	ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร)
2	$0.896 \pm 3.1 \times 10^{-3}$
5	$1.005 \pm 9.5 \times 10^{-3}$
10	$1.677 \pm 1.2 \times 10^{-3}$
15	$0.271 \pm 2.2 \times 10^{-3}$
20	$0.359 \pm 4.4 \times 10^{-3}$
ความเข้มข้นสูงสุดที่จำหน่าย	$0.175 \pm 1.5 \times 10^{-3}$

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ร้อยละการดูดซับน้ำและเมทานอล

น้ำหนักเมมเบรนแห้ง	=	0.0126	กรัม
น้ำหนักเมมเบรนหลังแช่จนอิ่มตัว	=	0.0221	กรัม

$$\% \text{ uptake} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100$$

w_1 = น้ำหนักเมมเบรนแห้ง (กรัม)
 w_2 = น้ำหนักเมมเบรนหลังแช่จนอิ่มตัว (กรัม)

$$\% \text{ uptake} = \frac{0.0221 - 0.0126}{0.0126} \times 100 = 75.34$$

2. การเปลี่ยนแปลงความหนาในน้ำและเมทานอล

ความหนาเมมเบรนแห้ง	=	0.018	กรัม
ความหนาเมมเบรนหลังแช่จนอิ่มตัว	=	0.043	กรัม

$$\% \text{ thickness change} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100$$

t_1	=	ความหนาเมมเบรนแห้ง (มิลลิเมตร)
t_2	=	ความหนาเมมเบรนหลังแช่จนอิ่มตัว (มิลลิเมตร)

3. ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนผ่านของเมมเบรน	=	0.0153	Sccs
ความดันต่าง	=	50.25	cmHg
เส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน	=	2.5	cm
ความหนาของเมมเบรน	=	0.0043	cm
พื้นที่ของเมมเบรน	=	4.91	cm ²

$$P = \frac{QL}{\Delta PA}$$

P	=	ค่าการซึมผ่านแก๊ส (cm ³ (STP)·cm)/(s·cm ² ·cmHg)
Q	=	อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนผ่านเมมเบรน (Sccs)
L	=	ความหนาของเมมเบรน (cm)
ΔP	=	ความดันต่าง (cmHg)
A	=	พื้นที่ของเมมเบรน (cm ²)

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{(0.0153 \text{ Sccs})(0.0043 \text{ cm})}{(50.25 \text{ cmHg})(4.91 \text{ cm}^2)} \\
 &= 2.67 \times 10^{-7} \text{ (cm}^3 \text{ (STP)·cm)/(s·cm}^2 \text{·cmHg)} \\
 &= 2672.78 \text{ Barrer}
 \end{aligned}$$

$$1 \text{ barrer} = 10^{-10} \text{ (cm}^3 \text{ (STP)·cm)/(s·cm}^2 \text{·cmHg)}$$

4. ค่าการนำโปรตอนในแนวภาคตัดขวางของเมมเบรน

ความหนาของเมมเบรนหลังแช่น้ำ	=	0.0020	เซนติเมตร
พื้นที่ผิวชั่วทองแดง	=	0.4418	ตารางเซนติเมตร
ความต้านทาน	=	30	โอห์ม

$$\sigma = \frac{1}{R} \left(\frac{L}{A} \right)$$

σ	=	ค่าการนำไอออนไฮโดรเนียม (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
R	=	ความต้านทาน (โอห์ม)
L	=	ความหนาของเมมเบรนหลังจากแช่น้ำ (เซนติเมตร)
A	=	พื้นที่หน้าตัดชั่วทองแดง (ตารางเซนติเมตร)

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{30 \text{ Ohm}} \left(\frac{0.0020 \text{ cm}}{0.4418 \text{ cm}^2} \right) \\ &= 0.00015 \text{ ซีเมนส์/เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปรีดี วันแฉลอะ เกิดวันที่ 30 พฤศจิกายน 2528 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี การศึกษาด้านจิต สาขาวิทยาศาสตร์ - เคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2557 และเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 The 23rd International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICHe 2013) ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จ.ขอนแก่น

