



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การสูญเสียกัมมันต์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

The Activation Losses in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell

นามผู้วิจัย นางสาวหงส์ ลีลาสุภกร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล, D.Sc.(ChE))

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒน์ ภูมิปัญญาคุณ, วศ.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ไพศาล กองกาญจนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสูญเสียกัมมันต์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

The Activation Losses in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell

โดย

นางสาวหงส์ ลีลาสุภกร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2551

หงส์ ลีลาศุภกร 2551: การสูญเสียกัมมันต์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ปรินูญวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์
เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D. 81 หน้า

การศึกษาการสูญเสียกัมมันต์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อค่าการสูญเสีย กัมมันต์และการสูญเสียอื่นๆที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2, 0.3, 0.4, และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และทำการเดินระบบโดยใช้ อุณหภูมิ 60, 70, และ 80 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลลดการสูญเสียกัมมันต์ การสูญเสียลัดข้าม การสูญเสีย โอห์ม และค่าความต้านทานรวมภายในเซลล์ แต่ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนจะเพิ่ม สูงขึ้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ทำให้ค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงลดลง และจาก ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ จากการทดลอง พบว่าสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายการสูญเสียกัม มันต์และสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ได้แม่นยำโดยมีความคลาดเคลื่อน ไม่เกินร้อยละ 1.4

Hong Leelasupakorn 2008 : The Activation Losses in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Terdthai Vatanatham, Ph.D. 81 pages.

The activation loss in 5 cm² proton exchange membrane fuel cell was studied. The effects of the temperature and the catalyst loadings on the activation loss and other losses in the fuel cell were investigated. In this study, fuel cells were fabricated by using the catalyst loadings of 0.2, 0.3, 0.4, and 0.6 mg/cm² and operated at 60, 70, and 80 °C. It was found that the cell performance increased with the cell temperature and the catalyst loadings. The increasing in the temperature and the catalyst loading decreased the activation loss, crossover loss, ohmic loss, and total resistance in the fuel cell but increased the exchange current density leading to increasing in the cell potential. The empirical model was developed from the relationship among temperature, catalyst loading, and cell performance. This model is able to estimate the activation loss and cell performance accurately to within 1.4% error.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.สุนันท์ ลิ้มตระกูล กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ที่ให้คำปรึกษาในการ
เรียนการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ
ผศ. พิพัฒน์ ภูมิปัญญาคุณ กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชารอง และดร. ชนะ รักษศิริ ผู้แทนบัณฑิต
สำหรับข้อเสนอแนะในการเขียนงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ
อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็น
ประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณ คุณปริญา บุญทันต์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการภาควิชา
วิศวกรรมเคมี และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องสาวทั้ง 2 คน รวมไปถึงทุกๆคนรอบข้างสำหรับการ
สนับสนุนและกำลังใจจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้
อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

หงส์ ลีลาสุกกร

สิงหาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
สรุป	64
ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	68
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	81

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง	26
2	ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงและความสัมพันธ์กับสมการเนิร์นสต์	27
3	ค่าที่ได้จากการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	58
4	ค่าที่ได้จากการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	59
5	ค่าที่ได้จากการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	59
6	ค่าที่ได้จากการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	59

ตารางผนวกที่

1	เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	69
2	เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	70
3	เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	71
4	เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	72
5	เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	73
6	เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
7 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	75
8 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	76
9 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	77
10 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	78
11 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	79
12 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อ เดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบหลักและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	6
2	เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์(Alkaline fuel cell, AFC)	10
3	เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก(Phosphoric acid fuel cell (PAFC)	11
4	เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน(Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)	12
5	เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตเหลว(Molten carbonate fuel cell, MCFC)	13
6	เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง(Solid Oxide fuel cell, SOFC)	13
7	การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	15
8	ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	16
9	โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน	17
10	โครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทิลีนหรือแนฟฟิออน	18
11	ขั้นตอนการปฏิบัติที่ฉาบลงบนเมมเบรน	19
12	การถ่ายโอนแก๊ส โปรตอน และอิเล็กตรอนภายในขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	22
13	ศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน/ออกซิเจน	28
14	เส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization Curve)	31
15	ตัวอย่างของเส้นกราฟทาเฟล (Tafel Plot)	33
16	กราฟแสดงการหาค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน	34
17	ระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	44
18	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	49
19	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	50
20	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	52
22 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	53
23 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	54
24 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	55
25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียลัดข้ามกับอุณหภูมิของเซลล์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน	56
26 กลไกการถ่ายโอนของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง	58
27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนกับอุณหภูมิของเซลล์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน	60
28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันทาเฟลกับอุณหภูมิของเซลล์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน	60
29 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรวมกับอุณหภูมิของเซลล์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน	61
30 เปรียบเทียบระหว่างผลทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์	63

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

H_2	=	แก๊สไฮโดรเจน
Pt	=	แพลทินัม
H^+	=	โปรตอน
e^-	=	อิเล็กตรอน
H_2O	=	น้ำ
W_{el}	=	พลังงานไฟฟ้า
ΔG	=	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์
n	=	จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา
F	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์
E	=	ศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติของเซลล์
ΔH	=	การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี
T	=	อุณหภูมิ (K)
ΔS	=	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี
ΔG^0	=	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ที่สภาวะมาตรฐาน
C_p	=	ค่าความจุความร้อน
H_i	=	ค่าเอนทัลปีจำเพาะ
S_i	=	ค่าเอนโทรปีจำเพาะ
f	=	ค่าฟูกาซิตี
E^0	=	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน
P	=	ความดัน
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส
p^*	=	ค่าความดันย่อยของแก๊ส
η	=	ประสิทธิภาพทางความร้อน
η_{ideal}	=	ประสิทธิภาพในอุดมคติของเซลล์เชื้อเพลิง
V_{cell}	=	ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์
E_{ernst}	=	ค่าศักย์ไฟฟ้าอุดมคติที่สภาวะใดๆ
η_{cross}	=	การสูญเสียกลับข้าม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

η_{act}	=	การสูญเสียกัมมันต์
η_{ohm}	=	การสูญเสียโอห์ม
η_{trans}	=	การสูญเสียการถ่ายโอน
i	=	ความหนาแน่นกระแส
R	=	ความต้านทานรวม
$R_{electronic}$	=	ความต้านทานอิเล็กทรอนิกส์
R_{ionic}	=	ความต้านทานไอออนิก
$R_{contact}$	=	ความต้านทานการสัมผัส
R_{proton}	=	ความต้านทานโปรตอน
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารที่ทำปฏิกิริยา
C_B	=	ความเข้มข้นกองใหญ่
C_S	=	ความเข้มข้นที่ผิว
δ	=	ความหนาแน่นของชั้นที่แพร่ผ่าน
i_L	=	ขีดจำกัดกระแส
i_0	=	ความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน
α	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กตรอนของปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด
r_M	=	ความต้านทานจำเพาะของเมมเบรน
λ_{age}	=	ปริมาณน้ำในเมมเบรนที่อายุการใช้งานต่างๆ
λ	=	ปริมาณน้ำภายในเมมเบรน
LHV_{H_2}	=	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน
L_{Pt}	=	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

การสูญเสียกัมมันต์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

The Activation Losses in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell

คำนำ

ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิง หรือ Fuel cell เริ่มเป็นที่รู้จักจากข่าวสารความก้าวหน้าทางวิทยาการและเทคโนโลยีทั้งทางวิทยุ โทรทัศน์หรือสื่อสิ่งพิมพ์ต่างๆในการเป็นเครื่องมือที่ให้กำเนิดไฟฟ้าจากกระบวนการทางเคมีโดยใช้แก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง นักวิทยาศาสตร์เป็นจำนวนมากได้หันมาให้ความสนใจกับทางเลือกใหม่ของแหล่งพลังงานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์และเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆในชีวิตประจำวัน ในลักษณะการใช้งานแทนที่แบตเตอรี่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือใช้งานด้านคมนาคมแทนเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่นรถไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แหล่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่ได้มาจาก น้ำมันเชื้อเพลิง แต่เนื่องมาจากความต้องการที่เพิ่มขึ้น และแหล่งผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำมัน ทั้งยังทำให้น้ำมันมีราคาสูงมากขึ้น จากสาเหตุดังกล่าวจึงได้มีการค้นคว้า และพัฒนาแหล่งพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งทางเลือกที่ได้รับความนิยมมากก็คือ การใช้พลังงานไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดซึ่งเดินเครื่องที่อุณหภูมิแตกต่างกันตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียสถึง 1,000 องศาเซลเซียส การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในชีวิตประจำวันไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในครัวเรือนหรือพาหนะที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นทุกวัน ซึ่งในการใช้งานลักษณะนี้ จะต้องใช้เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อยและเดินเครื่องได้โดยง่าย ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้จึงต้องเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งรูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงที่ง่ายและมีความเหมาะสมก็คือเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งเป็นเซลล์ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 80 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ ปัจจุบันหน่วยงานต่างๆทั้งภาครัฐและเอกชนได้ตระหนักถึงปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรน

แลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อใช้ในรถยนต์ในอนาคต ทั้งนี้เนื่องมาจากมีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะถ้าใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงจะไม่ก่อให้เกิดมลพิษเลยเพราะสิ่งที่เซลล์เชื้อเพลิงจะปล่อยออกมามีเพียงสิ่งเดียวก็คือ น้ำบริสุทธิ์ และไม่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน หรืออนุภาคเขม่าควันเช่นที่เกิดกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน และนอกจากเรื่องปราศจากมลพิษแล้ว ไม่มีส่วนใดในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลื่อนที่จึงไม่ก่อให้เกิดเสียงดังในระหว่างการทำงาน ดังนั้นจึงสามารถใช้งานในแหล่งชุมชนได้โดยไม่รบกวนผู้คน นอกจากนี้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงยังมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ 1-3 เท่า โดยขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ (สิริพรรณ, 2542)

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะมีข้อดีมากมายแต่ก็ยังมีข้อจำกัดอีกมากในเรื่องของราคา ประสิทธิภาพของเซลล์ และการใช้งาน ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและค้นคว้าทางด้านวิศวกรรมเพื่อพัฒนาและค้นคว้าวิธีการผลิตรวมไปถึงเทคนิคต่างๆ ในการใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนให้มีประสิทธิภาพดี และเหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะนำมาใช้งานในชีวิตประจำวัน แต่ทั้งนี้เนื่องจากต้นทุนที่ค่อนข้างสูงของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบโดยอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบก่อนที่จะทำการสร้างชิ้นงานจริง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งการสูญเสียหลักๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่อนข้างเด่นชัดอย่างหนึ่งก็คือการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียจากพลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาเคมีเรียกว่า การสูญเสียกัมมันต์ (Activation loss) แต่การสูญเสียค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนนี้ยังมีผู้ศึกษาไม่แพร่หลายและข้อมูลยังกระจัดกระจายอยู่มาก ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงสถานะที่ส่งผลต่อค่าการสูญเสียกัมมันต์ เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ สำหรับนำมาใช้ในการศึกษา ควบคุม และอธิบายถึงอิทธิพลของสถานะในการเดินเครื่อง รวมไปถึงกรรมวิธีการผลิตต่างๆ ที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ เพื่อใช้ในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงที่มีสมรรถนะสูง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียแก๊สไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. เพื่อสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายผลของปัจจัยความสูญเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว พื้นที่แก๊สแอคทีฟ (Active area) 5 ตารางเซนติเมตร
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน (Exchange current density) โดยศึกษาปัจจัยคือ
 - อุณหภูมิ ซึ่งศึกษาช่วงอุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิใช้งานทั่วไป
 - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาช่วง 0.2 - 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร
3. สร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Empirical Model) ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
4. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้เส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization curve)
5. วิเคราะห์ความสามารถในการทำนายประสิทธิภาพของสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เทคนิคการทำส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคม การประกอบเซลล์เชื้อเพลิงและการเดินระบบทดสอบ ตลอดจนผลการทดสอบและสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบ การสร้าง และศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการออกแบบและสร้างเซลล์เชื้อเพลิง

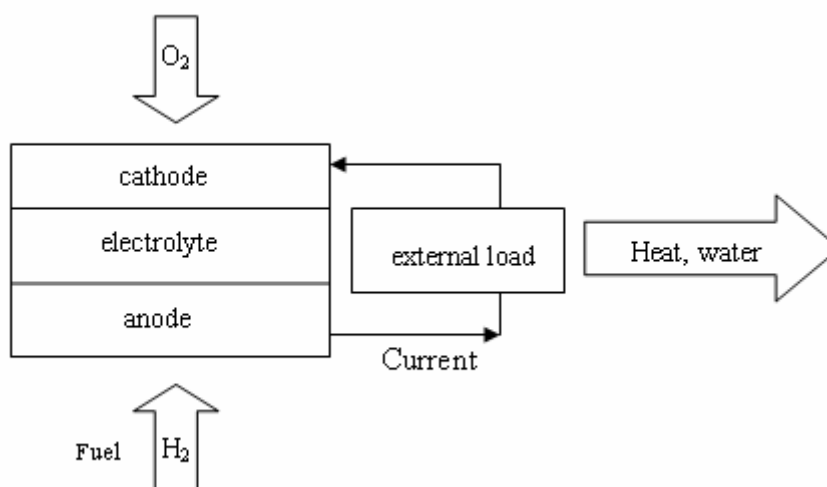
การตรวจเอกสาร

1. เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าได้โดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) อุปกรณ์นี้มีหลักการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ โดยมีข้อแตกต่างคือ แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานแน่นอน ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุและจ่ายประจุไฟฟ้า จึงต้องมีการนำไปชาร์จไฟก่อนการใช้งานและต้องชาร์จไฟใหม่เมื่อหมดแรงดัน ส่วนในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมสารตั้งต้นซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบตลอดเวลา และอุปกรณ์จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้เอง นั่นคือการเติมไฮโดรเจนและออกซิเจนตลอดเวลาจะช่วยขจัดปัญหาความจุที่จำกัดของแบตเตอรี่ออกไป

1.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) จุ่มหรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ คือแก๊สไฮโดรเจน จะถูกป้อนเข้าไปยังขั้วแอโนด ในขณะที่ตัวออกซิไดซ์ (Oxidant) คือแก๊สออกซิเจน จะถูกป้อนไปยังขั้วแคโทด แก๊สไฮโดรเจนที่เข้ามาทางด้านแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) แยกตัวออกเป็นอิเล็กตรอน (Electron) และโปรตอน (Proton) ขณะที่แก๊สออกซิไดซ์ที่เข้ามาทางด้านแคโทดจะรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) และผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาก็คือ กระแสไฟฟ้า น้ำ และความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบหลัก และการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

1.2 ประวัติและการพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง

หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีการรายงานครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวิสเซอร์แลนด์ศาสตราจารย์คริสเตียน ฟรีดริค เซินไบน์ (Christian Friedrich Schoenbein) ในปี ค.ศ. 1838 ว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยใช้กรดกำมะถันและหลอดแพลทินัมเป็นอิเล็กโทรด และได้ตีพิมพ์ในเดือนมกราคมปีถัดมาใน "Philosophical Magazine" (Berger, 1968) ต่อมาโดยอาศัยหลักการจากบทความชิ้นนี้เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1942 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเวลส์ ชื่อ เซอร์วิลเลียม โกรฟ (Sir William Grove) (Laminie and Dicks, 2000)(Hoogers, 2003) และรายงานในอีก 1 เดือนถัดมาถึงแบตเตอรี่ที่ใช้แพลทินัมและสังกะสีเป็นอิเล็กโทรดโดยใช้กรดกำมะถันและไนตริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งถือว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรกในโลก จนกระทั่งในปี 1959 วิศวกรชาวอังกฤษฟรานซิส โทมัส เบคอน (Francis Thomas Bacon) ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 กิโลวัตต์ได้สำเร็จ ในปีเดียวกันนี้เองที่ทีมงานที่นำโดยแฮร์รี ไอริก (Harry Ihrig) ได้สร้างแทรกเตอร์เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 15 กิโลวัตต์ให้กับอัลลิส-แชลล์เมอร์ส (Allis-Chalmers) ซึ่งได้นำไปแสดงทั่วสหรัฐอเมริกาในงานแสดงแฟร์ต่างๆ ระบบนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ มีแก๊สไฮโดรเจนอัดและแก๊สออกซิเจนเป็นสารตั้งต้น และในปีเดียวกันนี้เองที่เบคอนและทีมงานได้สร้างเครื่องผลิตไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 กิโลวัตต์ที่ใช้งานได้จริงสำหรับเครื่องเชื่อมไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่สิทธิบัตรของเบคอนในช่วงทศวรรษ 1960 ซึ่งหลักการเดียวกันนี้ก็นำไปใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐด้วยเพื่อผลิต

น้ำดื่มและพลังงานไฟฟ้า ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงต้นนี้ยังสูงอยู่มากเพราะค่าวัสดุที่แพง นอกจากนี้ยังทำงานในอุณหภูมิที่สูงมากจนเป็นปัญหาในการประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงยังคงเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากเชื้อเพลิงที่หาง่าย (ไฮโดรเจนและออกซิเจน) และการใช้งานที่สะอาด (Kordesch and Simader, 1996)

การพัฒนาต่อมาในช่วงทศวรรษ 1980 และ 1990 โดยเจฟฟรีย์ บัลลาร์ด (Geoffrey Ballard) เจ้าของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิงในประเทศแคนาดา (Ballard Power Systems Inc.) นำมาซึ่งการใช้เมมเบรนแนฟิออน (Nafion) วัสดุที่ถูกและทนทานกว่าเป็นอิเล็กโทรไลต์ หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาขึ้นมารวดเร็วอีกครั้งในกลางศตวรรษที่ 20 ซึ่งทำให้อนาคตการใช้เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผู้บริโภคมีความเป็นไปได้มากยิ่งขึ้น

อุตสาหกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ได้พัฒนาขึ้นในบริษัทยูไนเต็ดเทคโนโลยีส (United Technologies, UTX) ซึ่งเป็นบริษัทแรกที่ผลิตเซลล์เชื้อเพลิงใช้งานจริงในช่วงทศวรรษ 1960 บริษัทได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงให้กับองค์การนาซาเพื่อภารกิจพอลโล บริษัทลูกของ UTX ชื่อ ยูทีซีพาวเวอร์ (UTC Power) ได้เป็นบริษัทแรกที่ผลิตและจำหน่ายเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อเป็นระบบผลิตไฟฟ้าร่วมในโรงพยาบาล มหาวิทยาลัย และสำนักงานขนาดใหญ่ เครื่อง Pure Cell 200 เป็นระบบเซลล์เชื้อเพลิง ขนาด 200 กิโลวัตต์ ที่บริษัทได้จำหน่ายออกอย่างต่อเนื่อง ในขณะเดียวกัน ทางบริษัทได้เป็นผู้จำหน่ายเซลล์เชื้อเพลิงรายเดียวให้กับนาซา ซึ่งปัจจุบันได้ก้าวไปสู่ภารกิจกระสวยอวกาศ นอกจากนี้ยังได้มีความพยายามที่จะพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับขีปนาวุธและสถานีกระจายสัญญาณโทรศัพท์

บริษัทบัลลาร์ด (Ballard Power Systems Inc.) เป็นผู้ผลิตและพัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane, PEM) รายใหญ่ และเป็นผู้นำของโลกด้านเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อยานพาหนะ บริษัทฟอร์ดมอเตอร์ (Ford Motor Company) และ เดมเลอร์ไครสเลอร์ (Daimler Chrysler) เป็นผู้ลงทุนรายใหญ่ในบัลลาร์ด ในปี 2003 บริษัทรถยนต์โดยส่วนใหญ่เป็นลูกค้าของบัลลาร์ด มีแต่บริษัทเจนเนอรัลมอเตอร์ (General Motors, GM) และ โตโยต้า (Toyota) เท่านั้นที่มีหน่วยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงของตนเองซึ่งยกเลิกไปในปี 2005 ในปี 2004 นิสสัน (Nissan) และ ฮอนด้า (Honda) ก็ได้เริ่มโครงการเช่นเดียวกันนี้ ปัจจุบันนี้พบว่าบริษัทเจนเนอรัลมอเตอร์กำลังร่วมมือกับเดมเลอร์ไครสเลอร์ และ บีเอ็มดับเบิลยู (BMW) เพื่อพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกัน

ในขณะนี้ที่รัฐออสเตรเลียตะวันตกได้มีการทดลองใช้รถประจำทางขับเคลื่อนโดยเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างเมืองเพิร์ท (Perth) และเมืองท่าฟรีแมนเทิล (Fremantle) และจะขยายการทดลองนี้ไปสู่เมืองอื่นๆ ภายในประเทศ

บริษัทปลั๊กพาวเวอร์ (Plug Power Inc.) เป็นอีกหนึ่งผู้นำการออกแบบและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนสำหรับการใช้งานอยู่กับที่ เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการสื่อสาร แหล่งพลังงานหลัก แหล่งความร้อนร่วม และระบบเชื้อเพลิงสำหรับพลังงาน

ในปลายปี 2004 บริษัทเซลล์เชื้อเพลิงไมโครเอ็มทีไอ (MTI Micro Fuel Cells) บริษัทลูกของเมคคานิคอลเทคโนโลยีอิงค์ (Mechanical Technology Inc.) ได้ออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เมทานอล ตรง (Direct Methanol Fuel cell, DMFC) รุ่นแรกที่ใช้งานได้จริงทางการค้าออกมา ซึ่งการนำเมทานอลมาใช้มีข้อดีคือง่ายต่อการเก็บเพราะเป็นของเหลว และสะดวกในการใช้งาน แต่ประสิทธิภาพของเซลล์ก็จะลดลงไปด้วยเนื่องจากการปนเปื้อน

1.3 ข้อดีข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง เป็นอุปกรณ์ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งซึ่งอาศัยการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีจากแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่สูงและไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ อีกทั้งยังไม่เกิดเสียงรบกวนในระหว่างการเดินระบบ

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นได้มาจากการคำนวณโดยอาศัยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ไม่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle) ที่เป็นตัวควบคุมประสิทธิภาพการทำงานในเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนดังเช่นในระบบกังหันแก๊ส และเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ในเซลล์เชื้อเพลิงมาจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง ดังนั้นประสิทธิภาพในการทำงานจึงสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ในทางทฤษฎี แต่ถ้าพิจารณาจากหลักการอนุรักษ์พลังงาน ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอาจถูกจำกัดโดยการผลิตวัสดุพลังงานในขั้นแรก ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมอาจต่ำกว่าเครื่องยนต์เบนซินที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งพบได้เมื่อแก๊สไฮโดรเจนต้องถูกอัดภายใต้ความดันสูงหรือทำให้เป็นของเหลวสำหรับยานยนต์

อีกทางเลือกหนึ่งของการผลิตไฮโดรเจนคือการผลิตจากมีเทนซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงถึงประมาณ 80% หรือใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ซึ่งมีประสิทธิภาพต่างกันออกไป แต่การใช้ไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจกได้ อย่างไรก็ตามหากการจัดการที่ดีภายในกระบวนการจะสามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยเฉพาะที่แหล่งผลิตได้ง่ายกว่าและดีกว่าปล่อยให้รถยนต์ทุกคันปล่อยแก๊สเสียออกมามาก

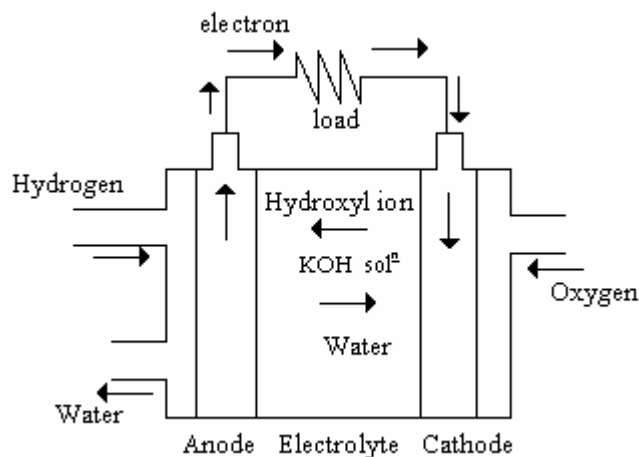
แม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะมีข้อดีมากมาย แต่เนื่องมาจากการทำงานที่ค่อนข้างซับซ้อน จึงทำให้การพัฒนาศักยภาพเป็นไปได้ยาก รวมทั้งต้นทุนที่ค่อนข้างสูงของเซลล์เชื้อเพลิงทำให้การใช้งานยังไม่แพร่หลายนักในขณะนี้เมื่อเทียบกับรถยนต์สันดาปภายในหรือการใช้แบตเตอรี่

1.4 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกออกได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปแล้วจะจำแนกได้ 5 ประเภท ได้แก่

1.4.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cell, AFC)

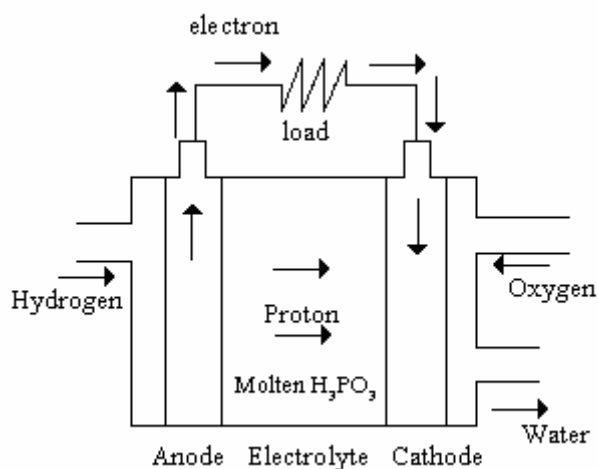
อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เหลว ดังในภาพที่ 2 โดยจะต้องใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์และแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เท่านั้น การใช้งานจำกัดอยู่ในงานทางอวกาศ เช่น ในยานอวกาศอพอลโล่ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 60-120 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cell, AFC)

1.4.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell, PAFC)

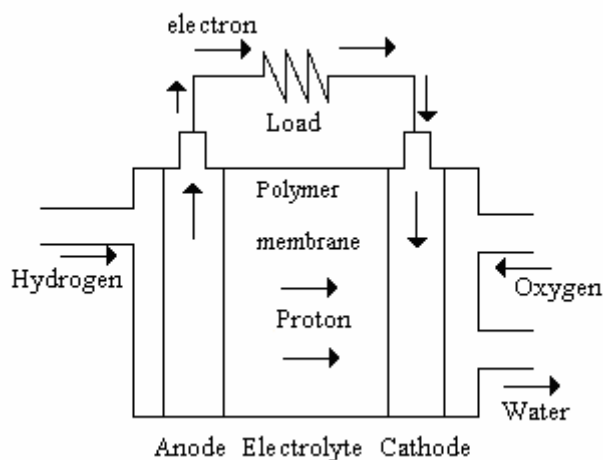
อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นพวกเกลือคาร์บอเนตเหลวของโซเดียม และโปแตสเซียม ในเมตริกเซรามิกส์ของลิเทียมอลูมินेट (LiAlO_2) โดยอุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ที่ประมาณ 650 องศาเซลเซียส ดังนั้นปัญหาจากการกัดกร่อนจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้ใช้งานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง สารไฮโดรคาร์บอนต่างๆจึงสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้โดยสะดวก เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ นิยมใช้ในโรงงานไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้าระดับเมกะวัตต์จึงจะเหมาะสมกับประสิทธิภาพการทำงานเนื่องจากระบบที่ใช้ค่อนข้างซับซ้อน



ภาพที่ 3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell, PAFC)

1.4.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell , PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ (Polymer electrolyte fuel cell, PEFC)

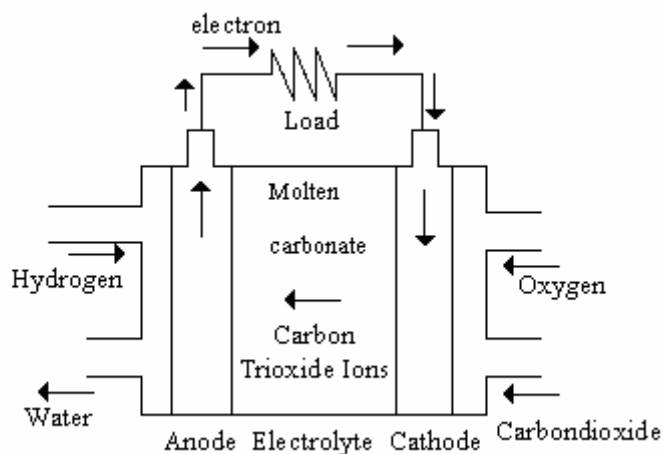
เซลล์เชื้อเพลิงรูปแบบนี้ใช้เมมเบรนพอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ดังในภาพที่ 4 ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาของเหลวที่กัดกร่อน เพราะของเหลวชนิดเดียวในเซลล์ก็คือ น้ำ เซลล์ชนิดนี้เรียกชื่อย่อทางเทคนิคเป็น PEMFC และใช้งานได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเมมเบรนพอลิเมอร์เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้จากเชื้อเพลิงเมทานอล โดยไม่ต้องเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนก่อน จึงเรียกเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใหม่นี้ว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลตรง (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) เนื่องจากอุณหภูมิการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนค่อนข้างต่ำจึงใช้เวลาในการเริ่มเดิน เครื่องน้อยกว่าประเภทอื่นๆ ประกอบกับบริษัทรถยนต์ต่างๆ ตระหนักถึงปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ จึงได้มีการพัฒนา PEMFC เพื่อใช้ในรถยนต์สำหรับอนาคตซึ่งได้เริ่มทำมาหลายปีแล้ว คาดว่าในอนาคตอันใกล้นี้จะมีรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ ทั้งในรูปของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลและรถโดยสาร



ภาพที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)

1.4.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตเหลว (Molten carbonate fuel cell, MCFC)

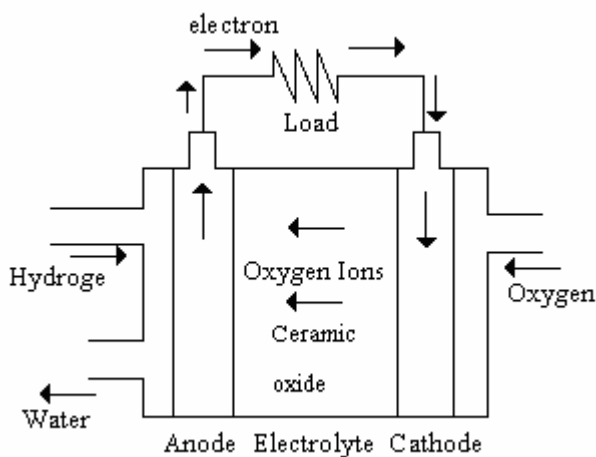
อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นพวกเกลือคาร์บอเนตเหลวของโซเดียม และ โพแทสเซียม ในเมตริกเซรามิกส์ของลิเทียมอลูมินา (LiAlO_2) โดยอุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ที่ประมาณ 650 องศาเซลเซียส ดังนั้นปัญหาจากการกัดกร่อนจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้ใช้งานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง สารไฮโดรคาร์บอนต่างๆจึงสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้โดยสะดวก เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ นิยมใช้ในโรงงานไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้าระดับเมกะวัตต์จึงจะเหมาะสมกับประสิทธิภาพการทำงานเนื่องจากระบบที่ใช้ค่อนข้างซับซ้อน



ภาพที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตเหลว (Molten carbonate fuel cell, MCFC)

1.4.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารเซรามิกส์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสารที่ใช้มากคือ สารประกอบของเซอร์โคเนีย โดยใช้งานที่อุณหภูมิ 650-1,000 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับการออกแบบและสารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ เช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตเหลว สารไฮโดรคาร์บอนต่างๆ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ และออกซิเจนในอากาศก็สามารถนำมาเป็นตัวออกซิไดซ์ได้ (Lamini and Dicks, 2000)



ภาพที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC)

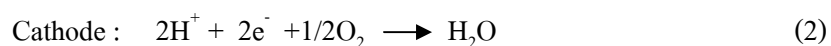
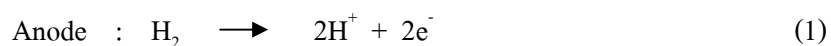
2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังนั้นในที่นี้จึงเลือกกล่าวถึงรายละเอียดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือPEMFC เป็นหนึ่งในชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำหรับยานพาหนะหรือตามสถานที่ต่างๆ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีจุดเด่นที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ และยังมีความเหมาะสมอย่างมากกับการนำไปใช้งานที่ต้องมีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงรูปแบบนี้ยังมีความพิเศษอยู่ที่การใช้เมมเบรนเป็นตัวอิเล็กโทรไลต์ซึ่งสามารถใช้ในการแลกเปลี่ยนโปรตอนอันเป็นหัวใจหลักในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสามารถให้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้มีการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้กับอุปกรณ์พกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ หรือคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก โดยเฉพาะการพัฒนาความเป็นไปได้ที่จะเอา PEMFC มาให้พลังงานกับยานพาหนะหรือรถยนต์ เทคโนโลยีของ PEMFC ต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นตรงที่ใช้เมมเบรนเป็นแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์บางที่เป็นสถานะของแข็งเป็นอิเล็กโทรไลต์และเป็นตัวกั้นแบ่งอิเล็กโทรดออกจากกัน และสภาวะที่ทำงานเป็นอุณหภูมิต่ำ การพ่นึกและประกอบเซลล์มีความซับซ้อนน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น อีกทั้งยังไม่มีสารกัดกร่อนกรดหรือเบสในระบบการทำงาน ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าของเหลวเดียวที่อยู่ในระบบก็คือน้ำ โดยปกติ PEMFC จะทำงานที่อุณหภูมิต่ำ 60 °C ถึง 80 °C ให้ศักย์ไฟฟ้าตอนเริ่มแรกเดินเครื่องได้เร็วกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้ PEMFC เป็นที่สนใจสำหรับการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้ในการขนส่ง PEMFC ต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์จึงจะเหมาะสมกับการทำงาน จึงมีการพัฒนาให้สามารถใช้สิ่งอื่นเป็นเชื้อเพลิงด้วย เช่น แก๊สธรรมชาติหรือน้ำมันเบนซิน แต่ที่น่าสนใจคือการใช้เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง นั่นคือ Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้กับกล้องถ่ายภาพคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กและอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กชนิดอื่นๆ

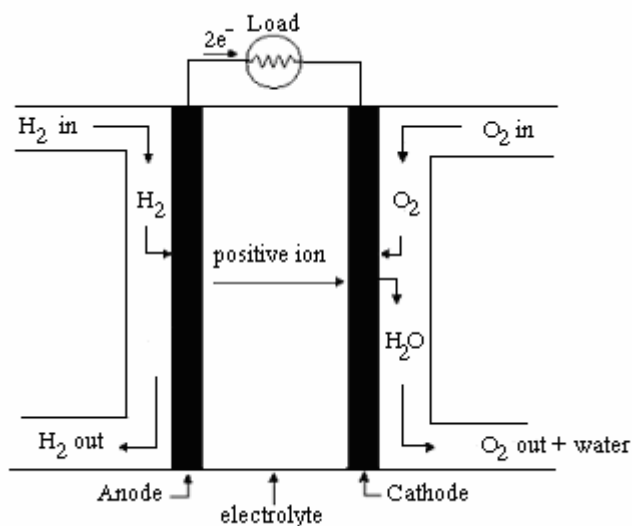
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะประกอบไปด้วยอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นแผ่นพอลิเมอร์ของแข็ง ซึ่งจะถูกระบายด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมเกาะอยู่ น้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์จะถูกกำจัดออกจากเซลล์ไปกับแก๊สทางด้านแคโทด ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับการสามารถในการส่งถ่ายโปรตอน ดังนั้นแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้จึงจำเป็นจะต้องมีความชื้นเพื่อให้กระบวนการนำไอออนของเมมเบรนเป็นไปได้สะดวก

2.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จะอาศัยการแตกตัวของแก๊สเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี เมื่ออัดแก๊สไฮโดรเจน จำนวน 1 โมเลกุลเข้าไปในด้านของแอโนด แก๊สจะถูกดันเข้าไปในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นโปรตอน 2 ตัว และอิเล็กตรอน 2 ตัว อิเล็กตรอนได้ถูกส่งผ่านออกไปยังขั้วไฟฟ้าและผ่านต่อไปยังสายไฟภายนอกจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น ขณะเดียวกันทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง แก๊สออกซิเจน $\frac{1}{2}$ โมเลกุล จะถูกอัดผ่านไปในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมตัวเข้ากับ โปรตอน 2 ตัวที่ผ่านเมมเบรนเข้ามาและอิเล็กตรอน 2 ตัวจากวงจรไฟฟ้าภายนอก กลายเป็นโมเลกุลของน้ำ 1 โมเลกุล โดยมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังสมการที่ (1)-(3)



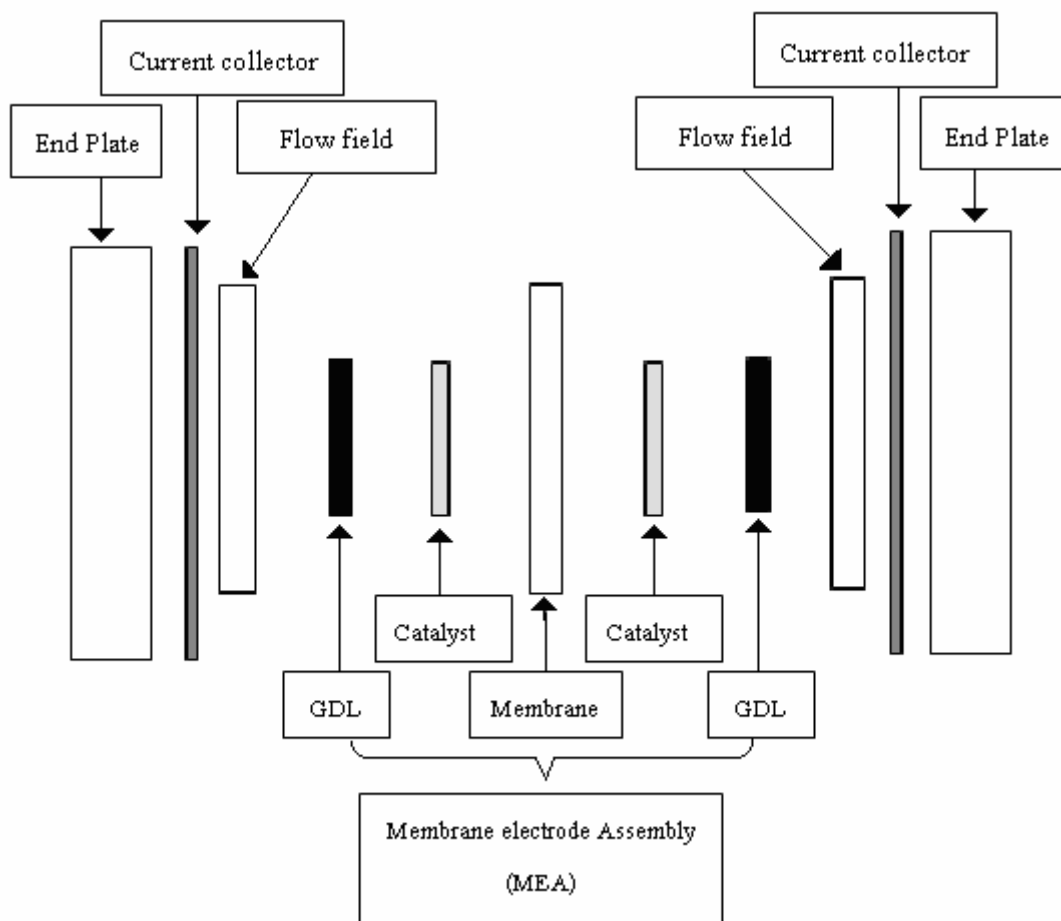
ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้แก่ ไฟฟ้ากระแสตรง น้ำและความร้อนดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

2.2 ส่วนประกอบของเซลล์

ส่วนประกอบต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

2.2.1 ส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรน (Membrane electrode assembly, MEA)

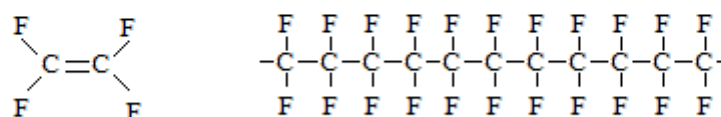
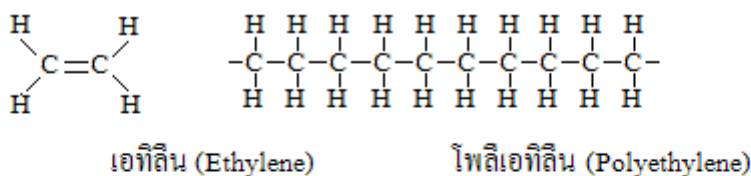
ส่วนนี้ถือเป็นหัวใจหลักของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นส่วนที่นำเอาขั้วไฟฟ้าที่มีสารตัวเร่งปฏิกิริยามาประกบกับตัวอิเล็กโทรไลต์ ในส่วนนี้จะประกอบด้วย

ก. เมมเบรน (Membrane) คือตัวอิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์ ทำจากวัสดุคล้ายกับแผ่นพลาสติกใส ที่เรียกว่า Polymer electrolyte membrane เป็นของแข็งอเนกโพลิเมอร์ ส่วนใหญ่จะเป็นพอลิเมอร์ของกรดเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิก (Perfluorosulfonic acid) สามารถให้โปรตอนผ่านได้แต่จะไม่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน คุณสมบัติที่ดีของเมมเบรนก็คือ จะต้องมีการนำโปรตอนสูง และมีความต้านทานอิเล็กตรอนสูง มีความต้านทานในการบวมตัว และ ไม่เกิดการแพร่ของแก๊ส ตัวอย่างเช่นเยื่อแผ่นแนฟฟิออน (NafionTM) ที่ผลิตโดยบริษัทดูปองต์ (DuPont) วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

1) โครงสร้างแกนฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon backbone) ที่มีลักษณะคล้ายเทฟลอน (Teflon) โดยมีพันธะ $-\text{CF}_2 - \text{CF}_2 - \text{CF}_2 -$ ต่อกันเป็นหลายร้อยพันธะ ดังแสดงเปรียบเทียบกับโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนในภาพที่ 9

2) โซ่กิ่ง $-\text{O} - \text{CF}_2 - \text{CF}_2 - \text{O} - \text{CF}_2 - \text{CF}_2 -$ ที่ต่อกับโมเลกุลของส่วนที่ 1 และส่วนที่ 3

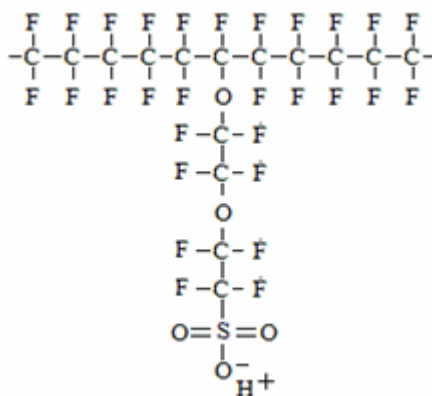
3) หมู่ไอออนของกรดซัลโฟนิก $\text{SO}_3^- \text{H}^+$ ดังแสดงในภาพที่ 10



เตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene)

ภาพที่ 9 โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน

ที่มา: Lamini and Dicks (2000)



ภาพที่ 10 โครงสร้างของซัลโฟเนตพลูออโรเอทิลีนหรือแอฟฟิออน

ที่มา: Lamini and Dicks (2000)

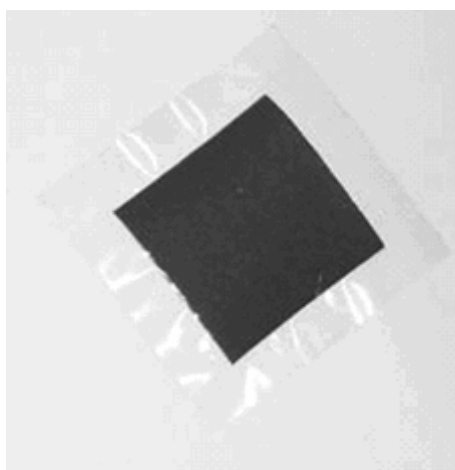
จากภาพที่ 10 จะเห็นว่าไอออนลบ จะติดอยู่กับโซ่กิ่งเสมอ และเคลื่อนที่ไม่ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อแผ่นเมมเบรนเปียกน้ำโดยมีการดูดซับน้ำเข้าไป ไฮโดรเจนไอออนของหมู่กรดซัลโฟนิกจะเคลื่อนที่ได้และผ่านเยื่อไปรวมกับอิเล็กตรอนสร้างพันธะเป็นโมเลกุลของน้ำ ด้วยกลไกนี้ทำให้เมมเบรนที่เปียกน้ำตลอดเวลาจะสามารถนำไฮโดรเจนไอออนหรือโปรตอนได้ดีนั่นเอง เมมเบรนมีหน้า ที่หรือคุณสมบัติสำคัญคือ ยอมให้ประจุบวกหรือโปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเท่านั้น แต่ไม่ยอมให้ประจุลบหรือแก๊สเคลื่อนที่ผ่านได้ เนื่องจากโครงสร้างของเมมเบรนมีเทฟลอนเป็นโครงสร้างแกน (Teflon™ backbone) ทำให้มีความแข็งแรงและเสถียรถึงแม้ว่าจะมีขนาดบางแต่แก๊สไม่สามารถผ่านได้ ทำให้แยกแก๊สไฮโดรเจนกันไว้ไม่ให้ผสมกับแก๊สออกซิเจนได้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แม้เมมเบรนจะเปียกน้ำแต่อิเล็กตรอนก็ไม่สามารถผ่านได้ อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและวิ่งผ่านออกไปทางวงจรไฟฟ้าภายนอกเซลล์และวิ่งกลับมาที่ขั้วแคโทดอีกฝั่งหนึ่งเพื่อให้ครบวงจร ซึ่งจะทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้านำไปใช้งานได้

ลักษณะทั่วไปของเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีค่าการนำโปรตอนที่สูง มีสมบัติขวางกั้นแก๊ส มีความแข็งแรงทางกล มีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมี และเป็นฉนวนทางไฟฟ้า เมมเบรนจะต้องไม่ละลายน้ำแต่สามารถดูดซับน้ำได้ และให้เกิดค่าการนำโปรตอนที่ดีในสถานะไฮเดรชัน และต้องยอมให้มีการส่งผ่านน้ำที่เพียงพอเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเมมเบรนซึ่งเหล่านี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับในเซลล์เชื้อเพลิงการส่งผ่านของโปรตอนจะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้วยโมเลกุลของน้ำที่ขับเคลื่อนไปในระหว่างสายโซ่ในเมมเบรน ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน โมเลกุลของไฮโดรเจนจะถูกทำให้แตกตัวออกที่ขั้วแพลทินัมและทำให้เกิดเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน(ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) เมื่อโปรตอนไหลผ่านเมมเบรน และอิเล็กตรอนไหลไปตามวงจรภายนอกทำให้เกิดความต่างศักย์และนำไปสู่กระแสไฟฟ้าในที่สุด ดังนั้น ในเมมเบรนต้องมีย่านน้ำเพื่อที่ไฮโดรเจนไอออนจะพาประจุผ่านเมมเบรนไปได้ ข้อจำกัดนี้ทำให้เมมเบรนชนิดนี้ไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำได้ เนื่องจากน้ำจะระเหยออกไปทำให้ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีน้ำมากเกินไปจะทำให้หน้าทวมเซลล์ซึ่งทั้งสองทางนี้จะเป็นปัญหาต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้

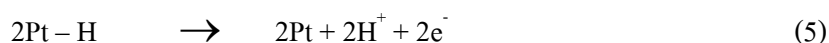
จ. ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะประกอบด้วยสองปฏิกิริยา คือ ครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดและครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ขั้วแอโนดและแคโทดแยกจากกันโดยเมมเบรนอิเล็กโตรไลต์ ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะมีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรเจนและการรวมตัวของอะตอมไฮโดรเจนกับออกซิเจน ให้กลายเป็นน้ำ โดยใช้ผงแพลตทินัม (Platinum) ทำเป็นชั้นบาง (Layer) เมมเบรน มีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาได้



ภาพที่ 11 ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ฉาบลงบนเมมเบรน

โดยปกติแล้วปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะเกิดช้าที่อุณหภูมิต่ำ ในที่นี้คือ ประมาณ 80°C ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วทั้งสองคือทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ แพลตทินัม ที่ขั้วแอโนด แก๊สไฮโดรเจนจะแพร่เข้ามาจนไป

สัมผัสกับอนุภาคของแพลทินัม ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจะทำให้โมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไฮโดรเจนอะตอม 2 อะตอมจับกับอะตอมของแพลทินัม และสลายพันธะได้ไฮโดรเจนไอออนคือโปรตอน และอิเล็กตรอนออกมา ปฏิกิริยาเกิดดังสมการที่ (4) และ (5)



ประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับตำแหน่งการเรียงตัวของอนุภาคในตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ จะต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวทำปฏิกิริยาและเมมเบรนหรือตัวอิเล็กโทรไลต์ คือมีการจัดเรียงตัวเป็นขอบเขตสามเฟสสัมผัสกัน (Three phase boundary) โดยพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในขอบเขตสามเฟสนี้ จะต้องมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า (Terrance, 2000)

ก. ชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer) หรือเรียกชื่อย่อทางเทคนิคว่า GDL โดยทั่วไปจะเป็นชั้นที่ทำขึ้นจากกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอนมีความหนาประมาณ 100 ถึง 300 ไมครอน ซึ่งจะอยู่ทั้งทางด้านแอโนดและแคโทด โดยเป็นส่วนหนึ่งของส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรนหรือ MEA โดยธรรมชาติของวัสดุที่นำมาทำชั้นแพร่แก๊สต้องมีความพรุนเพื่อให้แก๊สสามารถแพร่ผ่านเข้ามาได้ และเกิดการกระจายตัวเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ชั้นปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่บนเมมเบรน โดยแก๊สจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อย เหตุผลที่ GDL ต้องทำจากคาร์บอนเพื่อที่จะให้สามารถนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแอโนดผ่านไปยังแผ่นรวมกระแสเพื่อส่งผ่านออกไปยังวงจรไฟฟ้าได้

นอกจากนี้ชั้นแพร่แก๊สยังมีส่วนช่วยในการจัดการน้ำที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงขณะทำงาน ปริมาณน้ำที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ชั้นแพร่แก๊สที่ดีต้องให้ปริมาณไอน้ำผ่านไปเมมเบรนพอดีเปียกและไม่กักน้ำไว้ภายใน แต่ถ้าน้ำที่เกิดมากเกินไปจนไม่สามารถระบายออกจากเซลล์ได้จะทำให้เกิดการท่วม (Flooding) ใน GDL ได้ ซึ่งทำให้ทิศทางการแพร่ของแก๊สที่จะไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด

คุณสมบัติที่ดีของส่วนประกอบอิเล็กโทรดและเมมเบรนมีดังนี้ (Vielstich *et al.*, 2003)

ชั้นแพร่แก๊ส

- มีค่าสภาพการแพร่แก๊สสูง
- มีความพรุนสูง
- มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง

ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

- เนื้อมีความสม่ำเสมอ
- เป็นชั้นบางๆ

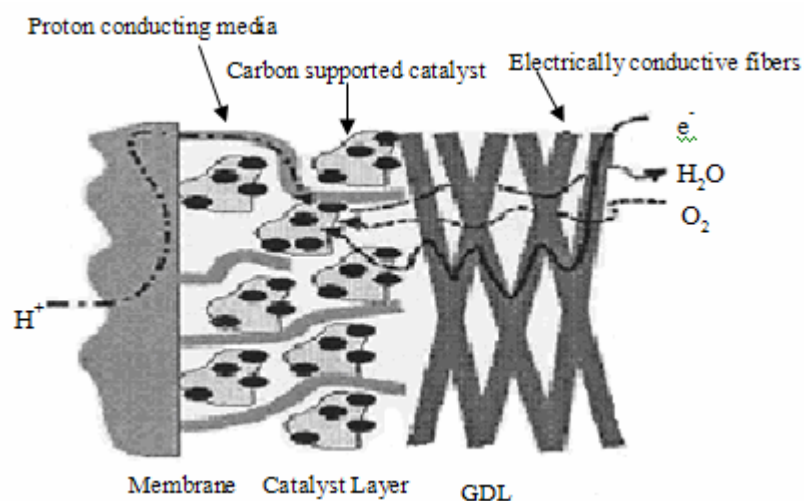
เมมเบรน

- มีค่าสภาพการนำโปรตอนสูง
- มีความต้านทานในการบวมน้ำ
- ไม่เกิดการแพร่ของแก๊ส

และเมื่อประกอบเข้าเป็น MEA แล้ว ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- มีค่าความต้านทานในการสัมผัสน้อย (low contact resistance)
- มีค่าความต้านทานโดยรวมน้อย (low bulk resistance)
- สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี

จากคุณสมบัติที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าอิเล็กโทรดหรือขั้วไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง อิเล็กโทรดที่มีประสิทธิภาพดี ควรมีกระบวนการถ่ายโอนมวลและประจุที่ดีในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงกำลังทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การถ่ายโอนแก๊ส โปรตอน และอิเล็กตรอนภายในขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ที่มา: Litster and McLean (2004)

กระบวนการถ่ายโอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของโปรตอนระหว่างชั้นปฏิกิริยาผ่านเมมเบรนไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้านหนึ่ง
2. อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างแผ่นรวมกระแสกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นแพร่แก๊ส
3. แก๊สตัวทำปฏิกิริยาและแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้เคลื่อนที่เข้าและออกจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2.2 แผ่นทางไหล (Flow field) มีลักษณะเป็นแผ่นเซาะร่องเป็นช่องทางไหล (Flow channel) มีหน้าที่กระจายการไหลของแก๊สไปยังชั้นแพร่แก๊ส และนำอิเล็กตรอนเข้าหรือออกจาก MEA ได้ วัสดุส่วนใหญ่จึงเป็นพวกโลหะและพวกแกรไฟต์ (Graphite) ด้านในของช่องทางไหลถัดจากชั้นแพร่แก๊ส จะเป็นร่องให้แก๊สสามารถผ่านได้ ความกว้างและความลึกของช่องนี้จะส่งผลถึงประสิทธิภาพต่อการกระจายตัวของแก๊สที่จะไปทำปฏิกิริยา

2.2.3 แผ่นรวมกระแส (Current collector plates) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่รับและจ่ายประจุอิเล็กตรอนของเซลล์เชื้อเพลิงผ่านทางวงจรไฟฟ้าภายนอก แบ่งออกเป็นฝั่งแอโนดและแคโทด โดยอิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนจากขั้วแอโนดจะผ่านชั้นแพร่แก๊สมายังแผ่นรวมกระแสทางแอโนดก่อนจะออกจากเซลล์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งออกจากเซลล์

ไปตามวงจรไฟฟ้าภายนอกและไปเข้าที่แผ่นรวมกระแสอีกฝั่งทางขั้วแคโทด โดยอิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากเซลล์จะต่อวงจรกับเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า หลอดไฟ เกิดครบวงจรไฟฟ้าสมบูรณ์

2.2.4 แผ่นประกบปริม (End plates) เป็นส่วนที่ประกบและอัดชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน เป็นเซลล์เชื้อเพลิงให้แต่ละชิ้นส่วนสัมผัสกันดี และแก๊สไม่รั่วไหลออกไปภายนอก

3. ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไป สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประสิทธิภาพนี้ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านเซลล์ ยิ่งกระแสถูกดึงไปใช้มาก ประสิทธิภาพก็ลดลงมาก

ในการศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ก่อนอื่นควรนิยามประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ในอุดมคติ (Ideal performance) เพื่อกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ในอุดมคติ แล้วจึงคำนวณความสูญเสียที่เกิดขึ้น จากนั้นเมื่อนำความสูญเสียมารวมออกจากประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ในอุดมคติ ก็จะสามารถทราบค่าประสิทธิภาพในการทำงานจริง (Actual performance) ได้

4. บทบาทของพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy) และศักย์ไฟฟ้าเนิร์นสต์ (Nernst potential)

ในเซลล์เชื้อเพลิง แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นภายในเซลล์จะขึ้นอยู่กับพลังงานอิสระกิบส์ ของเซลล์เชื้อเพลิง ค่าแอกติวิตี (Activity) ของสารตั้งต้น และกระแสไฟฟ้าที่ถูกดึงออก

งานที่มากที่สุดที่ได้จากพลังงานไฟฟ้า (W_{el}) จากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิและความดันคงที่ จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังสมการที่ (6)

$$W_{el} = \Delta G = -nFE \quad (6)$$

n = จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา

F = ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,487 Coulombs/g-mole electron)

E = ศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติของเซลล์ (Ideal potential of cell)

(7) การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์หาได้จากความสัมพันธ์เทอร์โมไดนามิกส์ดังสมการ

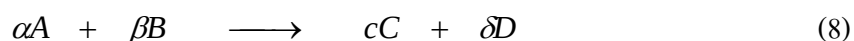
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (7)$$

ΔG = การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์

ΔH = การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี

ΔS = การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

สำหรับปฏิกิริยาในเซลล์ทั่วไป



ที่สภาวะมาตรฐานการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ของปฏิกิริยา คือ

$$\Delta G^\circ = cG_C^\circ + \delta G_D^\circ - \alpha G_A^\circ - \beta G_B^\circ \quad (9)$$

ศักย์ไฟฟ้าสามารถคำนวณหาได้จากค่าความจุความร้อน (C_p) ของแต่ละสารขึ้นกับอุณหภูมิ และจากค่าของทั้ง ΔS° และ ΔH° ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 298 K ดังสมการ (10)

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (10)$$

a , b และ c คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลอง

ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Specific enthalpy) ของสารระหว่างเกิดปฏิกิริยาหาได้จากสมการ (11)

$$H_i = H_i^\circ + \int_{298}^T C_{pi} dT \quad (11)$$

และที่ค่าเอนโทรปีจำเพาะ (Specific entropy) ที่อุณหภูมิใดๆ จะเป็น

$$S_i = S_i^o + \int_{298}^T \frac{C_{pi}}{T} dT \quad (12)$$

จากนั้นหาค่า ΔH และ ΔS ของปฏิกิริยาได้จาก

$$\Delta H = \sum_i n_i H_i|_{out} - \sum_i n_i H_i|_{in} \quad (13)$$

$$\Delta S = \sum_i n_i S_i|_{out} - \sum_i n_i S_i|_{in} \quad (14)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a , b และ c รวมทั้ง H^o และ S^o หาได้จากตารางค่ามาตรฐาน ซึ่งจะทำการคำนวณหาค่า ΔH และ ΔS และจากค่าเหล่านี้สามารถคำนวณหา ΔG และ E ที่อุณหภูมิใดๆ ได้

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ของปฏิกิริยาเคมีใน สมการที่(8) สามารถอธิบายได้จากสมการที่(15)

$$\Delta G = \Delta G^o + RT \ln \frac{f_C^c f_D^\delta}{f_A^\alpha f_B^\beta} \quad (15)$$

แทนค่า ΔG และ ΔG^o

$$E = E^o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{f_A^\alpha f_B^\beta}{f_C^c f_D^\delta} \quad (16)$$

หรือ

$$E = E^o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod[\text{reactant fugacity}]}{\prod[\text{product fugacity}]} \quad (17)$$

สมการ(17) คือ รูปทั่วไปของสมการเนิร์นสต์ (Nernst equation) หรือศักย์ไฟฟ้าเนิร์นสต์ซึ่งเป็น ศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้ของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ T , E^o สำหรับค่า E^o คำนวณได้จาก ΔG^o สำหรับปฏิกิริยาเซลล์ที่อุณหภูมินั้นๆ

โดยทั่วไปแล้วเซลล์เชื้อเพลิงจะทำงานที่ความดันต่ำพอที่จะประมาณค่าฟูกาซิตี (fugacity) เท่ากับความดันย่อยได้

5. สมรรถนะในอุดมคติ (Ideal Performance)

ศักย์ไฟฟ้าเนิร์นส์ หรือ E เป็นขีดจำกัดหรือประสิทธิภาพที่สูงที่สุดที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง ปฏิกิริยารวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 1 และความสัมพันธ์ของสมการของเนิร์นส์สำหรับแต่ละปฏิกิริยาดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง

ชนิดของเซลล์ เชื้อเพลิง	ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด	ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด
Polymer Electrolyte	$\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$
Phosphoric Acid	$\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$
Alkaline	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow 2(\text{OH})^-$
Molten Carbonate	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{CO}_3^{2-} \longrightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{CO}_3^{2-}$
Solid Oxide	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{O}^{2-} \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CH}_4 + 4\text{O}^{2-} \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{O}^{2-}$

CO – carbon monoxide

e^- - electron

H_2O - water

CO_2 – carbon dioxide

H^+ - hydrogen ion

O_2 - oxygen

CO_3^{2-} - carbonate ion

H_2 – hydrogen

OH^- - hydroxyl ion

ที่มา: Parson Inc (2004)

สมการเนิร์นส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Ideal standard potential, E^0) ของปฏิกิริยาภายในเซลล์กับศักย์ไฟฟ้าสมดุลในอุดมคติ (Ideal equilibrium potential, E)

สำหรับปฏิกิริยารวมของเซลล์นั้น ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะเพิ่มเมื่อเพิ่มความดันย่อยคือเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นและลดความดันย่อยของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2 ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงและความสัมพันธ์กับสมการของเนิร์นส์

ปฏิกิริยาเซลล์	สมการเนิร์นส์
$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	$E = E^0 + (RT/2F)\ln[P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}}] + (RT/2F)\ln[P_{\text{O}_2}^{1/2}]$
$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_{2(c)} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_{2(a)}$	$E = E^0 + (RT/2F)\ln[P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}}(P_{\text{CO}_2})_{(a)}] + (RT/2F)\ln[P_{\text{O}_2}^{1/2}(P_{\text{CO}_2})_{(c)}]$
$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$	$E = E^0 + (RT/2F)\ln[P_{\text{CO}}/P_{\text{CO}_2}] + (RT/2F)\ln[P_{\text{O}_2}^{1/2}]$
$\text{CH}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	$E = E^0 + (RT/8F)\ln[P_{\text{CH}_4}/P_{\text{H}_2\text{O}}^2(P_{\text{CO}_2})] + (RT/8F)\ln[P_{\text{O}_2}^2]$

(a) – anode

P – gas pressure

F – Faraday's constant

(c) – cathode

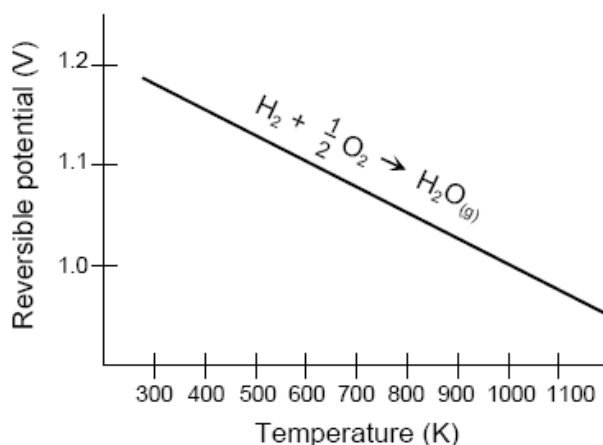
R – universal gas constant

E – equilibrium potential

T – temperature (absolute)

ที่มา: Parson Inc (2004)

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในอุดมคติ (Ideal standard potential, E^0) ที่ 298 K ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและออกซิเจนคือ 1.229 โวลต์ โดยมีน้ำในสถานะของเหลวเป็นผลิตภัณฑ์ หรือ 1.18 โวลต์ โดยมีน้ำในสถานะแก๊สเป็นผลิตภัณฑ์ ศักย์ไฟฟ้า คือ ผลต่างของปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจน นั่นคือ ผลต่างของ 1.229 โวลต์และ 1.18 โวลต์ คือ พลังงานอิสระของกิบส์ที่ใช้ในการระเหยของน้ำที่สภาวะมาตรฐาน



ภาพที่ 13 ศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน/ออกซิเจน

ที่มา: Parson Inc (2004)

ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential) ของเซลล์เชื้อเพลิงได้รับอิทธิพลจากความเข้มข้นของสารตั้งต้น ศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นได้ถ้าให้สารตั้งต้นที่เข้าที่ขั้วแอโนดและแคโทดนั้นบริสุทธิ์ หากไม่บริสุทธิ์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะลดลง และความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ทางออกของเซลล์จะน้อยกว่าที่เข้ามาตอนแรก

ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ในอุดมคติ สามารถ บ่งบอกได้โดย ค่าศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติของเซลล์ (Thermodynamic potential, ideal voltage) ซึ่งสามารถนิยามได้ด้วยสมการเนิร์นสต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิงซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐานในอุดมคติของปฏิกิริยาภายในเซลล์กับศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะสมดุลในอุดมคติ (Ideal equilibrium voltage) ที่อุณหภูมิและความดันย่อยต่างๆของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าอุดมคติได้ดังนี้

$$E_{Nernst} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln[p_{H_2}^* (p_{O_2}^*)] \quad (18)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)

$p_{H_2}^*$ คือ ความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแอโนด (atm)

$p_{O_2}^*$ คือ ความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแอโนด (atm)

n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอน ในที่นี้มีค่าเป็น 2 สำหรับแก๊สไฮโดรเจน

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (J/mol.K)

E_0 คือ ศักย์ไฟฟ้าอุดมคติที่สภาวะมาตรฐาน

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,487 C/equ.)

(Ronald *et al.*, 2000)

6. ดุลพลังงานของเซลล์ (Cell Energy Balance)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถทำดุลมวลและพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่ออธิบายถึงประสิทธิภาพไฟฟ้า การดุลพลังงานรอบเซลล์เชื้อเพลิงพิจารณาการดูดและคายพลังงานของกระบวนการ (เช่น พลังงานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา และพลังงานที่สูญเสียหรือ heat loss ที่เกิดขึ้นในเซลล์) ดุลพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นกับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงเพราะในแต่ละชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

โดยทั่วไปดุลพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง คือ เอนทัลปีของสารตั้งต้นที่ไหลเข้าเซลล์จะเท่ากับเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ที่ไหลออกจากเซลล์ร่วมกับอีก 3 เทอม คือ (1) ความร้อนสุทธิที่เกิดโดยทั้งทางกายภาพและทางเคมีภายในเซลล์ (2) กำลังไฟกระแสตรง (DC power) ที่ออกจากเซลล์ (3) ความร้อนที่สูญเสียจากเซลล์ไปสู่สิ่งแวดล้อม

7. ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (Cell Efficiency)

ประสิทธิภาพความร้อน (thermal efficiency) ของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงาน นิยามได้ว่าเป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี ΔH

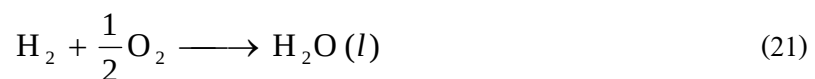
$$\eta = \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta H} \quad (19)$$

โดยทั่วไปพลังงานเคมี (เชื้อเพลิง) จะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน แล้วจึงเปลี่ยนเป็นพลังงานกลตามลำดับ ซึ่งพลังงานกลนั้นสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ สำหรับการเปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานกลจะใช้เครื่องจักรความร้อน ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องจักรจะถูกจำกัดด้วยสัดส่วนของอุณหภูมิสัมบูรณ์

เซลล์เชื้อเพลิงจะเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนไฟฟ้าเคมีในอุดมคติ เช่น เซลล์เชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) ของปฏิกิริยา ก็คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นประสิทธิภาพในอุดมคติของเซลล์เชื้อเพลิง คือ

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (20)$$

โดยส่วนใหญ่แล้ว ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะดูจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (Free energy) ที่สภาวะมาตรฐาน



$$\Delta G_r^0 = G_{\text{H}_2\text{O}(l)}^0 - G_{\text{H}_2}^0 - \frac{1}{2}G_{\text{O}_2}^0 \quad (22)$$

ที่สภาวะมาตรฐานที่ 25°C (298 K) และความดัน 1 บรรยากาศ พลังงานความร้อน (ΔH) ในปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจน คือ 285.8 kJ/mole และพลังงานอิสระ (Free energy) สำหรับงานที่ใช้ประโยชน์ได้ คือ 237.1 kJ/mole ดังนั้นประสิทธิภาพความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงในอุดมคติที่ผันกลับได้ของไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ที่สภาวะมาตรฐานคือ

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237.1 \text{ kJ/mole}}{285.8 \text{ kJ/mole}} = 0.83 \quad (23)$$

ประสิทธิภาพจริงของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอธิบายได้ในเทอมของสัดส่วน ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จริงต่อศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จริงจะมีค่าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ เพราะเกิดการสูญเสีย (Loss) ของโพลาไรเซชัน (Polarization) ในเซลล์ และการสูญเสียโอห์ม (Ohmic losses)

ประสิทธิภาพความร้อน (Thermal efficiency) ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและออกซิเจนสามารถเขียนในเทอมของศักย์ไฟฟ้าที่ได้จริงดังนี้

$$\eta = \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta H} = \frac{\text{Useful Power}}{(\Delta G/0.83)} = \frac{\text{Volts}_{\text{actual}} \times \text{Current}}{\text{Volts}_{\text{ideal}} \times \text{Current}/0.83} = \frac{(0.83)(V_{\text{actual}})}{E_{\text{ideal}}} \quad (24)$$

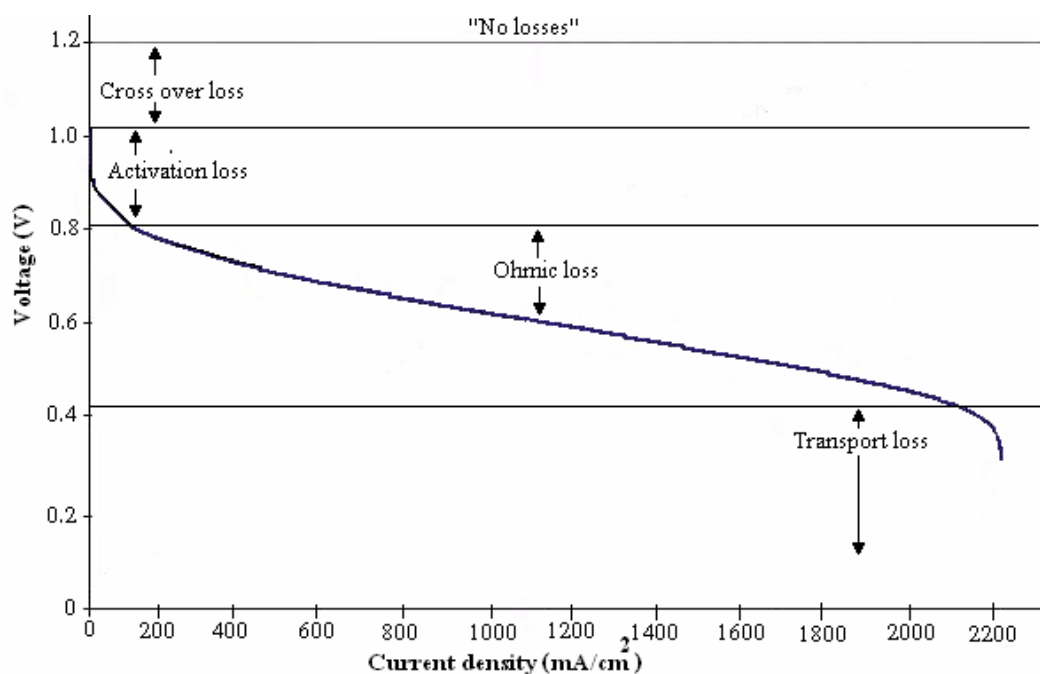
ศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติของกระบวนการผันกลับได้ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ความดัน 1 บรรยากาศและ 25 °C คือ 1.229 โวลต์ ดังนั้นประสิทธิภาพความร้อน ของเซลล์เชื้อเพลิงจริงที่ความต่างศักย์ V_{cell} เป็น

$$\eta = \frac{0.83 \times V_{\text{cell}}}{E_{\text{ideal}}} = \frac{0.83 \times V_{\text{cell}}}{1.229} = 0.675 \times V_{\text{cell}} \quad (25)$$

8. สมรรถนะจริง (Actual Performance)

ในการหาศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์ (Actual cell potential) ศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์จะมีค่าลดลงจากศักย์ไฟฟ้าอุดมคติ เนื่องจากความสูญเสียที่ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible losses) ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization curve) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าจริงจะมีความสัมพันธ์กับค่าความสูญเสียต่างๆดังแสดงในสมการ

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{ernst}} - \eta_{\text{cross}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{trans}} \quad (26)$$



ภาพที่ 14 เส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization Curve)

จากภาพที่ 14 จะเห็นได้ว่าความสูญเสียที่ไม่สามารถฟื้นกลับได้ ประกอบไปด้วยความสูญเสียหลักๆ 4 รูปแบบ ได้แก่

8.1 การสูญเสียลัดข้าม (Cross over loss)

เป็นการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ข้ามผ่านเมมเบรนของแก๊สหรือประจุไฟฟ้าซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ข้ามผ่าน เมมเบรนของแก๊สที่ยังไม่มีการแตกตัว หรือการเคลื่อนที่ข้ามผ่านเมมเบรนของอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพลดลง

8.2 การสูญเสียกัมมันต์ (Activation losses)

เป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่พื้นผิวของอิเล็กโทรดถูกควบคุมด้วย จลนพลศาสตร์ของอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือความสูญเสียจากปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง เกี่ยวข้องโดยตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมีความคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาเคมีมากในเรื่องของพลังงานกัมมันต์(Activation barriers)หรือพลังงานกระตุ้นขวางกัน ที่สารทำปฏิกิริยาจะต้องมีพลังงานเอาชนะได้ โดยการสูญเสียกัมมันต์ จะเกิดขึ้นที่ทั้งทางด้านแคโทดและแอโนด

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของการสูญเสียกัมมันต์ (Activation losses) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (27)$$

โดยที่ α = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กตรอนของปฏิกิริยา(Electron transfer coefficient)
ที่ขั้วอิเล็กโทรด

i_0 = ความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน (Exchange current density)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 A.s/mol)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.413 J/mol.K)

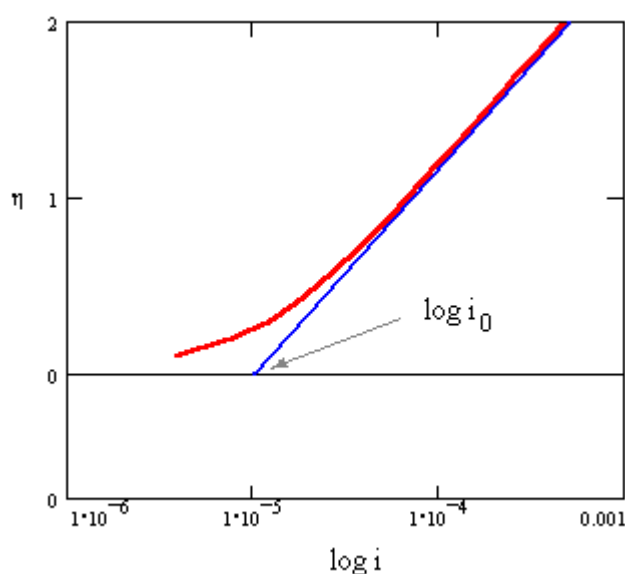
n = จำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ (n = 2)

T = อุณหภูมิ (K)

เส้นกราฟทาเฟล (Tafel plot) ใช้ในการหาค่าของความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนโดยอาศัยจุดตัดแกนที่ $\eta = 0$ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนเป็นค่าความหนาแน่นสูงสุดที่จะเกิดได้เมื่อไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น และหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากความชันของเส้นกราฟ ดังแสดงในภาพที่ 15 รูปแบบทั่วไปอย่างง่ายของสมการทาเฟล สามารถอธิบายการสูญเสียกัมมันต์ดังนี้

$$\eta_{act} = a + b \log i \quad (28)$$

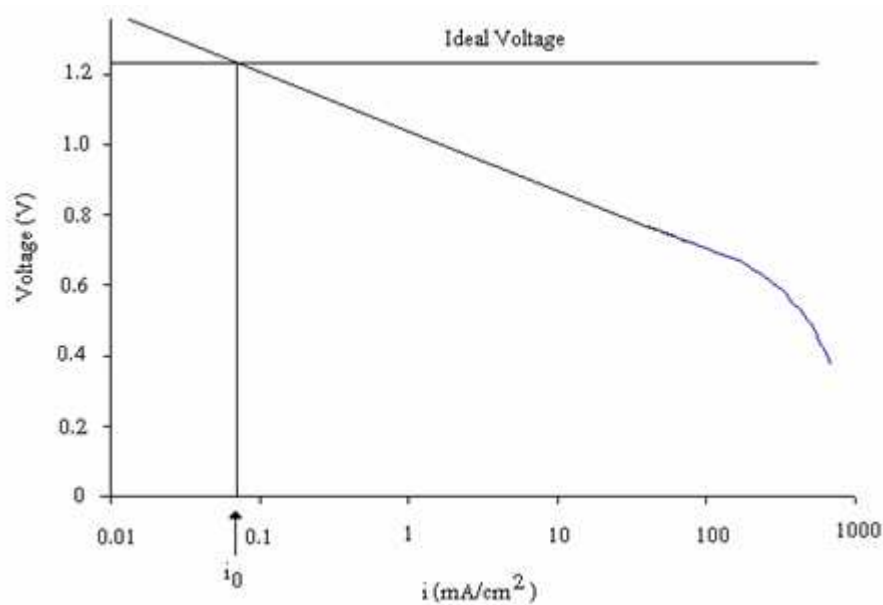
เมื่อ $a = (-2.303RT / \alpha nF) \log i_0$ และ $b = 2.303RT / \alpha nF$ ซึ่งเทอม b เรียกว่าความชันทาเฟล (Tafel slope) และได้จากความชันของ η ที่เป็นฟังก์ชันของ $\ln i$ ในกราฟทาเฟลทำให้มีความพยายามที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้า (Electro-catalyst) ที่ให้ความชันทาเฟลต่ำในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 15 ตัวอย่างเส้นกราฟทาเฟล (Tafel Plot)

ที่มา: Mccarron (2007)

หรืออีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่า i_0 ก็คือ การใช้เส้นโค้งโพลาไรเซชัน ซึ่งเป็นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และความหนาแน่นกระแส โดยค่าความหนาแน่นกระแสจะอยู่ในสเกลลอการิทึม (logarithm) ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 กราฟแสดงการหาค่าความหนาแน่นกระแส (i_0)

จากภาพที่ 16 เมื่อทำการลากเส้นไปตัดกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่อุดมคติ และจากจุดตัดนั้นลากเส้นขนานแกน Y ลงมาตัดกับแกน X จะได้ค่า i_0 ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ณ จุดที่ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น ส่วนค่าความชันหาเพลก็สามารหาได้จากค่าความชันของกราฟในภาพที่ 16

8.3 การสูญเสียโอห์ม (Ohmic losses)

เกิดจากความต้านทานการไหลของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ และความต้านทานการไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรด การลดการสูญเสียโอห์มที่ไหลผ่านอิเล็กโทรไลต์ทำได้โดยการลดช่องว่างระหว่างผิวอิเล็กโทรดและเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ เพราะว่าการสูญเสียในอิเล็กโทรไลต์และขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไปตามกฎของโอห์ม การสูญเสียโอห์มอธิบายได้โดยสมการดังนี้

$$\eta_{ohm} = iR \quad (29)$$

โดยที่ i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซลล์

R คือ ความต้านทานของเซลล์รวม

$$R = R_{electronic} + R_{ionic} + R_{contact} \quad (30)$$

โดยที่ $R_{electronic}$ คือ ความต้านทานอิเล็กทรอนิกส์

R_{ionic} คือ ความต้านทานไอออนิก

$R_{contact}$ คือ ความต้านทานการสัมผัส

8.4 การสูญเสียการถ่ายโอนมวล (Mass transport losses)

เป็นผลมาจากสารตั้งต้นถูกใช้ไปที่ขั้วอิเล็กโทรดด้วยปฏิกิริยาเคมี จึงมีค่าความต่างศักย์ที่สูญเสียจากการที่วัสดุรอบๆ เซลล์ไม่สามารถรักษาความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลทั้งหมดไว้ได้ ทำให้เกิดเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration gradient) ขึ้น นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอีกหลายอย่างที่ช่วยให้เกิดเกรเดียนต์ของความเข้มข้นคือการแพร่อย่างช้าๆ ในสถานะแก๊สในรูพรุนของอิเล็กโทรดเพื่อเข้าและออกจากอิเล็กโทรด หรือการแพร่ของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์เพื่อเข้าหรือออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ค่าความหนาแน่นของกระแสค่าหนึ่ง

อัตราการถ่ายเทมวลไปยังขั้วอิเล็กโทรดในหลายๆกรณีอธิบายได้ด้วยกฎการแพร่ข้อที่ 1 ของฟิค (Fick's first law of diffusion) คือ

$$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\delta} \quad (31)$$

โดยที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารที่ทำปฏิกิริยา (diffusion coefficient of the reacting species)

C_B คือ ความเข้มข้นของใหญ่ (bulk concentration)

C_S คือ ความเข้มข้นที่ผิว

δ คือ ความหนาแน่นของชั้นที่แพร่ผ่าน

ขีดจำกัดกระแส (Limiting current, i_L) คือ กระแสที่เกิดจากอัตราสูงสุดที่สารตั้งต้นสามารถป้อนไปยังอิเล็กโทรดและจะเกิดขึ้นเมื่อ $C_S = 0$

$$i_L = \frac{nFDC_B}{\delta} \quad (32)$$

จากสมการทั้งสองสมการข้างต้นจะได้

$$\frac{C_S}{C_B} = 1 - \frac{i}{i_L} \quad (33)$$

สมการของเนิร์นส์ ที่สภาวะสมดุลหรือเมื่อไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้า คือ

$$E_{i=0} = E^o + \frac{RT}{nF} \ln C_B \quad (34)$$

เมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นที่ผิวจะมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นกองใหญ่ สมการของเนิร์นส์จึงเป็น

$$E = E^o + \frac{RT}{nF} \ln C_S \quad (35)$$

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ขั้วอิเล็กโทรดที่เรียกว่า การสูญเสียการถ่ายโอนมวล

$$\Delta E = \eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_S}{C_B} \right) = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (36)$$

ในการวิเคราะห์การสูญเสียการถ่ายโอนมวลจะสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียกับมันต์ในปฏิกิริยาถ่ายเทประจุ เช่น ความหนาแน่นของกระแสที่เปลี่ยนไปสูงๆ การสูญเสียกับมันต์จะถูกตัดทิ้งเมื่อเปรียบเทียบกับ การสูญเสียการถ่ายโอนมวล (ส่วนใหญ่จะเหมาะกับเซลล์อุณหภูมิสูง)

เป้าหมายของการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงคือการทำให้การสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งหมายความว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเข้าใกล้ค่าศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ ซึ่ง

สามารถทำได้โดยการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง เช่นปรับปรุงโครงสร้างของอิเล็กโทรด ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าเดิม อิเล็กโทรไลต์มีค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ส่วนประกอบของเซลล์มีขนาดที่บางกว่าเดิม หรือปรับเปลี่ยนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ แต่สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอยู่แล้วการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ใช้ในการเดินระบบ เช่น ความดันหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างไรก็ตาม สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปแล้วการเดินระบบที่อุณหภูมิหรือความดันสูงมักจะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความเสถียรและความทนทานของส่วนประกอบต่างๆของเซลล์ได้

9. สถานะในการเดินระบบที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในระยะที่ผ่านมา มีสมรรถนะที่สูงขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ใช้ในการเดินระบบ เช่นความดัน อุณหภูมิ และตัวแปรอื่นๆ (Parson Inc, 2004)

9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

อุณหภูมิมีผลอย่างมากกับประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เพราะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานภายในเซลล์ลดลง โดยลดค่าความต้านทานโอห์ม (ohmic resistance) ของอิเล็กโทรไลต์เป็นหลัก นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนมวล ในภาพรวมจึงเป็นการเพิ่มสมรรถนะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งมีข้อมูลจากการทดลองพบว่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นในช่วง 1.1 มิลลิโวลต์ ถึง 2.5 มิลลิโวลต์ ต่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส และนอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิยังช่วยลดการดูดซับทางเคมีของคาร์บอนมอนนอกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยการเพิ่มอุณหภูมิก็มียึดจำกัดอันเนื่องมาจากความดันไอของน้ำที่มีค่าสูงในเมมเบรน ซึ่งอาจทำให้เมมเบรนขาดความชื้นและลดการนำไอออน (ion conductivity) ลงได้

9.2 ผลของความดันแก๊สป้อนที่มีต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

การเพิ่มความดันมีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนแก๊สให้เข้าสู่ชั้นปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มความดันที่สูง

จนเกินไปอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเมมเบรนได้ ในการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการเพิ่มความดันจะต้องไม่มากเกินไปและมีความสมดุลระหว่างความดันในฝั่งแอโนด และฝั่งแคโทด

10. งานวิจัยในปัจจุบัน

จากทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิงนักวิจัยได้มีการศึกษา ค้นคว้า หาแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงเซลล์เชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานรวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพ ของเซลล์เชื้อเพลิงให้มากขึ้น ทั้งการปรับปรุงในตัววัสดุที่นำมาใช้งานตลอดจนการพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงให้มีความคงทน ราคาถูกลง และสมรรถนะที่สูงขึ้น นอกจากนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็น การศึกษาถึงสถานะที่ใช้ในการเดินระบบ และส่งผลให้มีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงรวมไปถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แพร่หลายของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ได้อาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งพิจารณาเฉพาะการสูญเสียกัมมันต์และการสูญเสียโอห์มในเซลล์เชื้อเพลิง ไม่รวมถึงความสูญเสียการถ่ายโอนมวล มีลักษณะดังนี้ (Mann *et al.*, 2000)

$$V_{cell} = E_{Nernst} + \eta_{act} + \eta_{ohmic} \quad (37)$$

โดยที่ E_{Nernst} มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (18)เมื่อแทนค่าตัวแปรที่ทราบค่าจะเป็นดังสมการที่ (38)

$$E_{Nernst} = 1.229 - (8.5 \times 10^{-4})(T - 298.15) + (4.308 \times 10^{-5})T(\ln p_{H_2}^* + 182 \ln p_{O_2}^*) \quad (38)$$

การสูญเสียกัมมันต์รวมจากวิธีเอนพิริคัลโดยอาศัยข้อมูลจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของบัลลาร์ด โมเดล Mark V ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์เป็นดัง สมการที่ (39) คือ

$$\eta_{act} = -0.944 + 0.00354T + 7.80 \times 10^{-5}T(\ln(C_{O_2}^*)) - 0.000196T(\ln(i)) \quad (39)$$

และเมื่ออาศัยข้อมูลจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของบัลลาร์ด โมเดล Mark IV ได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการที่ (40) คือ

$$\eta_{act} = -0.9514 + 0.00312T + 7.40 \times 10^{-5} T(\ln(C_{O_2}^*)) - 0.000187T(\ln(i)) \quad (40)$$

ส่วนสมการของการสูญเสียโอห์ม สามารถหาได้โดยอาศัยสมการที่ (29) และ (30)

$$\eta_{ohm} = iR \quad (29)$$

$$R = R_{electronic} + R_{ionic} + R_{contact} \quad (30)$$

โดยมีการรวมเทอมของค่าความต้านทานไอออนิกและความต้านทานสัมผัสให้อยู่ในเทอมของความต้านทานโปรตอนเป็นดังสมการที่ (41) คือ

$$\eta_{ohmic} = -i(R_{electronic} + R_{proton}) \quad (41)$$

โดยที่

$$R^{proton} = \frac{r_M l_d}{A} \quad (42)$$

ซึ่งจากข้อมูลการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของบัลลาร์ด โมเดล Mark V และ Mark V ได้ความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะของเมมเบรน (r_m) เป็น

$$r_M = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{i}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{i}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda - 0.634 - 3 \left(\frac{i}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (43)$$

โดยที่ λ คือค่าคงที่จากการทดลองแสดงถึงปริมาณน้ำภายในเมมเบรน

ซึ่งแบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายผลของปัจจัยต่างๆ เช่น แก๊สที่ป้อน ความดัน อุณหภูมิ ในการเดินระบบ และความหนาแน่นของกระแส รวมถึงพื้นที่กัมมันต์ และความหนาของเมม

เบรณ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดของการนำแบบจำลองนี้ไปใช้งานเนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ได้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรณแลกเปลี่ยนโปรตอนของบัลลาร์ด โมเดล Mark IV และ Mark V เท่านั้น จากการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถทำนายค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ค่อนข้างแม่นยำสำหรับกรณีที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่สูงนัก จึงสามารถอธิบายได้ว่าพื้นที่ใช้งาน และความหนาของเมมเบรณเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้

หลังจากนั้นมีการพัฒนาปรับปรุงในส่วนเทอมของความต้านทาน จำเพาะของเมมเบรณ ได้ความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะของเมมเบรณ เป็นดังสมการ (Fower *et al*, 2002)

$$r_M = \frac{181.6[1 + 0.03(i/A) + 0.062(T/303)^2 (i/A)^{2.5}]}{[\lambda_{age} - 0.634 - 3(i/A)\exp(3.25(T - 303)/T)]} \quad (44)$$

ซึ่ง λ_{age} คือค่าคงที่จากการทดลองแสดงถึงปริมาณน้ำในเมมเบรณที่อายุการใช้งานต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรณแลกเปลี่ยนโปรตอนขึ้นมา โดยสมการส่วนใหญ่จะอาศัยสมการพื้นฐานที่ได้มาจากการงานของ Mann และคณะในปี 2000 แต่จะมีเพิ่มเติมในส่วนของเทอมการสูญเสียอันเนื่องมาจากการแพร่ของแก๊ส (diffusion overpotential) ซึ่งแสดงได้ดังสมการเอ็มไพริคัล (Maher and Baghdadi, 2005)

$$\eta_{diff} = m \exp(ni) \quad (45)$$

โดย m และ n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของแก๊สในเซลล์ และมีการคิดรวมประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีสมการ ดังนี้

$$E_{fc} = \frac{2V_{cell}F}{M_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \quad (46)$$

โดย LHV_{H_2} คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้นี้พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่ลดลง และการถ่ายโอนมวลที่ดีขึ้น และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงยังเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มความดันจะทำให้ค่าความดันย่อยของแก๊สเพิ่มมากขึ้นซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษา ก็คือการศึกษาถึงผลขององค์ประกอบในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งสรุปว่าผลของตัวเร่งปฏิกิริยาในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง และจากการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปเมื่อมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะมีสมรรถนะที่สูงขึ้น (Raimundo *et al.*, 2006) แต่ถ้าหากเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นผลจะกลับกัน โดยทำการศึกษาที่ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และใช้สัดส่วนของปริมาณแนฟฟิออน คาร์บอน และตัวเร่งปฏิกิริยาเดียวกัน ผลปรากฏว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อสังเกตที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆจะเห็นว่าสมรรถนะของเซลล์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากพื้นที่ผิวที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีเพิ่มสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่ไม่มีโหลดเพิ่มสูงขึ้น และที่ความหนาแน่นกระแสกลางและสูง สมรรถนะของเซลล์จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.05-0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากค่าความต้านทานภายในเซลล์ลดลง แต่ถ้าหากเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่านี้ความต้านทานภายในเซลล์จะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าสาเหตุหลักๆที่ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีเพิ่มสูงขึ้น และค่าการนำทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสะสมของกระแสดีขึ้นเพราะการสัมผัสระหว่างชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและคาร์บอนดีขึ้น แต่ในทางตรงข้ามหากทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอีก (มากกว่า 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) จะเกิดข้อจำกัดในการถ่ายโอนมวล เนื่องมาจากความหนาแน่นของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะทำให้การนำทางไฟฟ้าเป็นไปได้ยากลำบากขึ้น (Raimundo *et al.*, 2006)

เมื่อศึกษาการเตรียมขั้วอิเล็กโทรด 2 แบบ คือแบบที่มีและไม่มีชั้นการแพร่แก๊ส พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และเซลล์เชื้อเพลิงที่มีชั้น

การแพร่แก๊สจะมีสมรรถนะที่สูงกว่า และนอกจากนี้ยังพบว่าค่าการแลกเปลี่ยนความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นด้วย (Sunny *et al.*, 2003)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแบบแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ และพบว่าค่าการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแส และค่าความชันของกราฟพาเฟลจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานรวมภายในเซลล์จะมีค่าที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบเพิ่มสูงขึ้น (Kadjo *et al.*, 2007) จากการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมรรถนะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อพิจารณาในช่วงที่การสูญเสียกัมมันต์เป็นปัจจัยสำคัญ การเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มอัตรา การเกิดปฏิกิริยาทำให้การสูญเสียกัมมันต์ลดลง ต่อมาในช่วงของการสูญเสียโอห์มเป็นหลัก พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความต้านทานลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแพร่ผ่านของ แก๊สเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้มีการกระจายตัวของน้ำที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาและน้ำ ที่เข้าสู่เซลล์พร้อมกับแก๊สกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้โซนที่มีการนำไฟฟ้าต่ำเนื่องจากขาด น้ำลดลง (Coppo *et al.*, 2006)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

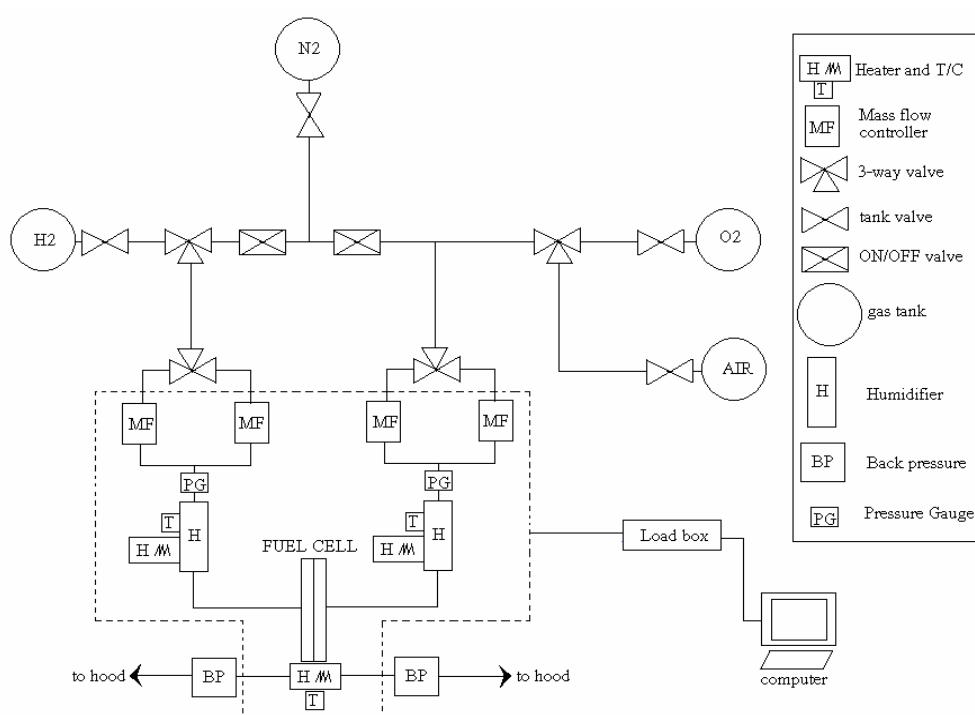
1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แพลทินัมบนคาร์บอนแบลค (40% Pt/C Hispec™ 4000, Alfa Aesar)
2. เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Nafion® 115 ผลิตโดยบริษัท DuPont)
3. กระดาษคาร์บอน (SGL-Bare Carbon Paper 10BA)
4. แผ่นเทฟลอน (Teflon)
5. ชิ้นส่วนต่างๆของเซลล์ ได้แก่ช่องทางไหล (Flow Channel) , แผ่นรวมกระแส (Current collector plate) และแผ่นประกบริม(End plate)
6. น้ำดีไอออไนซ์ (Deionized Water)
7. Isopropanol alcohol
8. สารละลายแนฟฟิออน 5 % (Nafion)
9. แก๊สไนโตรเจน
10. แก๊สออกซิเจน
11. แก๊สไฮโดรเจน
12. เมทานอล
13. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
14. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก
2. ซ้อนดักสารสแตนเลส
3. หลอดหยด
4. ปีกเกอร์
5. เครื่องกวนระบบความถี่สูง
6. เครื่องกวนด้วยระบบแม่เหล็ก

7. เครื่องสเปร์ยอะตอมลิสต์
8. โคมไฟและหลอดไฟขนาด 30 วัตต์
9. ขาตั้ง
10. ถังมือยาง
11. แวนดา
12. ที่ปิดจุ่มก
13. ปากคีบ
14. ไมโครมิเตอร์
15. เทอร์โมมิเตอร์
16. เครื่องมือวัดทอร์ก
17. เครื่องอัด
18. ระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง



ภาพที่ 17 ระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

จากภาพที่ 17 แสดงระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบไปด้วย 5 ส่วนหลักๆ ได้แก่

1. อุปกรณ์ควบคุมและวัดอัตราการไหล (mass flow controller , MKS)
2. หอให้ความชื้น(Humidifiers)
3. อุปกรณ์ควบคุมและวัดอุณหภูมิ(temperature controller and thermocouple)
4. อุปกรณ์ควบคุมโหลดไฟฟ้าและวัดค่าทางไฟฟ้า (load box, Scribner associates inc., รุ่น 890 CL)
5. อุปกรณ์แสดงผล (คอมพิวเตอร์พีซี Pentium4)

วิธีการ

วิธีการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญ คือ

1. ขั้นตอนการเตรียมเซลล์เชื้อเพลิง

1. เตรียมสารละลายหมึก โดยการผสมแพลทินัม 40% บนคาร์บอนแบล็ค น้ำดีไอออไนซ์ ไอโซโพรพานอล และสารละลายเนฟฟิออนเข้าด้วยกัน
2. เคลือบสารละลายหมึกที่เตรียมไว้ลงบนเมมเบรนให้มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการทั้งสองด้าน โดยในส่วนนี้จะมีการเตรียมโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร
3. ประกบทั้ง 2 ด้านของเมมเบรนที่เคลือบสารละลายหมึกไว้แล้วด้วยกระดาษคาร์บอนทั้งสองด้าน จากนั้นทำการอัดด้วยแรง 2.5 ตัน อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 นาที
4. ทำการประกบด้วยแผ่นทางไหล แผ่นรวมกระแส และแผ่นประกบริม จากนั้นจึงยึดชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกันด้วยน็อตโดยใช้ทอร์คขนาด 6 ฟุต-ปอนด์
5. ทำซ้ำข้อ 1-4 โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.2 เป็น 0.3, 0.4, และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. การเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิง

1. ทำการต่อเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงดังภาพที่ 17
2. ป้อนแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้าทางด้านแอโนดและแคโทดโดยใช้อัตราการไหล 0.2 และ 0.1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ
3. ปรับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและอุปกรณ์ให้ความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียส
4. ทำการเดินระบบภายใต้ความดันบรรยากาศ
5. บันทึกผลการทดลอง จากนั้นทำซ้ำโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและอุปกรณ์ให้ความชื้น เป็น 70 และ 80 องศาเซลเซียส

3. ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

1. คำนวณหาการสูญเสียลดข้ามโดยอาศัยสมการที่ (26) โดยตัดเทอมของการสูญเสียการถ่ายโอนมวลออกเนื่องจากไม่มีการศึกษาในช่วงกระแสสูงๆ จากผลต่างระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีและค่าศักย์ไฟฟ้าจริงในขณะที่ยังไม่มีกระแส

$$V_{cell} = E_{nernst} - \eta_{cross} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{trans} \quad (26)$$

ณ จุดที่ไม่มีการดึงโหลด การสูญเสียกัมมันต์และการสูญเสียโอห์มจะเท่ากับ 0 ดังนั้นการสูญเสียลดข้าม สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{cross} = E_{nernst} - V_{cell} \quad (47)$$

2. คำนวณหาการสูญเสียกัมมันต์ จากสมการที่ (27) โดยใช้กราฟทาเฟล เพื่อหาค่า i_0 และค่าความชันทาเฟล โดยอาศัยหลักการจากภาพที่ 16

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (27)$$

3. จากนั้นคำนวณหาค่าการสูญเสียโอห์มโดยอาศัยสมการ (26) และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานรวมของเซลล์โดยอาศัยสมการที่ (29)

$$\eta_{ohm} = iR \quad (29)$$

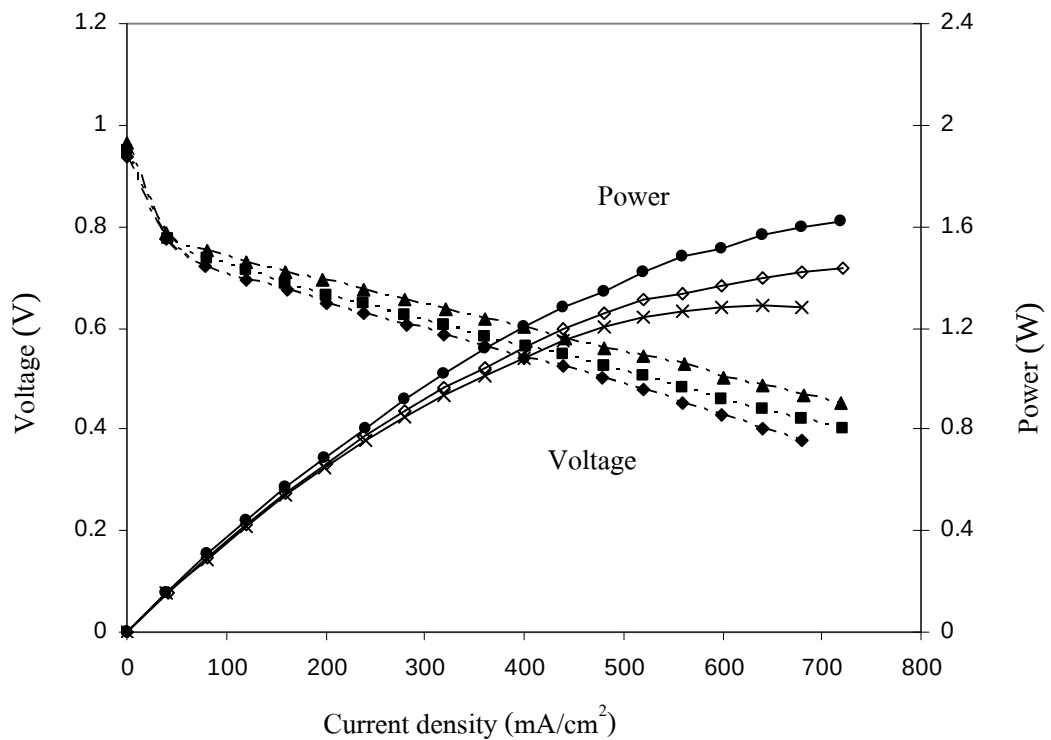
4. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียลดข้าม ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน ค่าความชันทาเฟล และ ค่าความต้านทานรวมของเซลล์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้

5. เปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์และค่าที่ได้จากผลการทดลอง

ผลและวิจารณ์

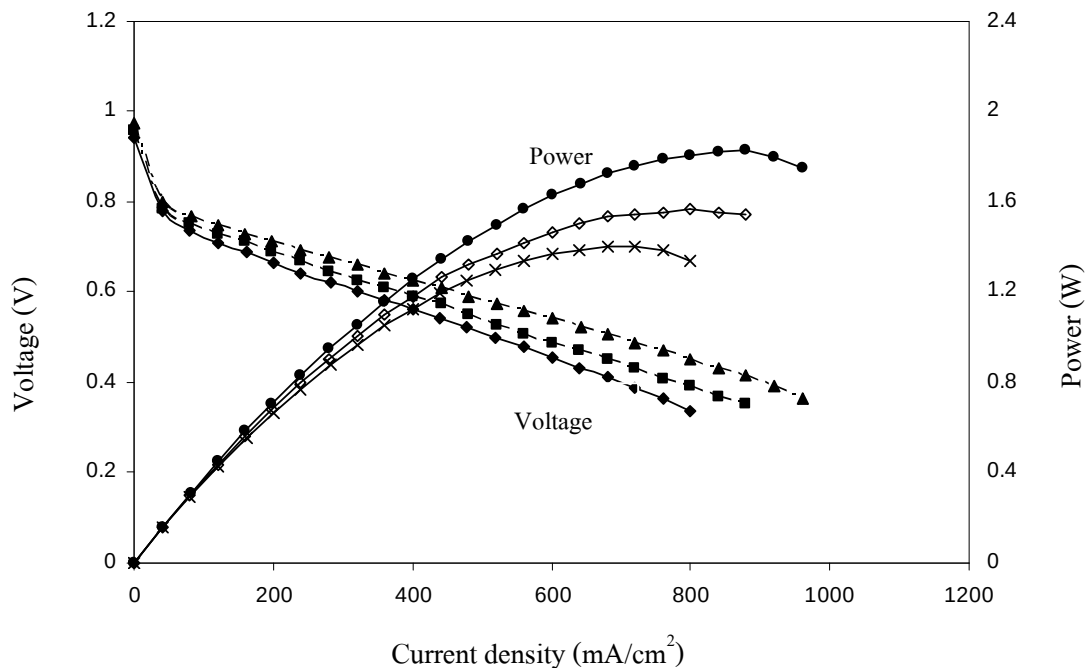
ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของการทำการทดลองและส่วนของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนของการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย โดยส่วนย่อยแรกจะทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการเดินระบบที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน และส่วนย่อยที่ 2 จะทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ส่วนของการทดลองในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบ ได้ทำการศึกษาจากเส้นโค้งโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากัน โดยการปรับค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบ 3 ค่าด้วยกันคือ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียสและใช้อุณหภูมิเดียวกันในอุปกรณ์ให้ความชื้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่าไรก็ตาม ดังแสดงในภาพที่ 18-21



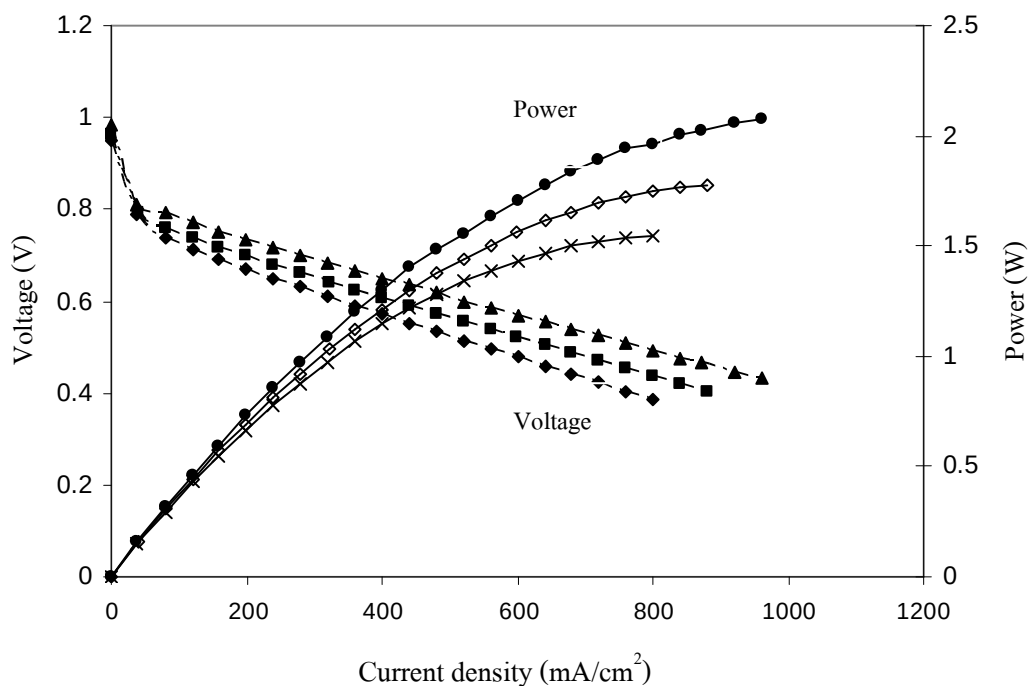
ภาพที่ 18 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (---◆--- ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C, ---■--- ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 70 °C, ---▲--- ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C, —×— กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C, —○— กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 70 °C, —●— กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C)

เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรดังในภาพที่ 18 เมื่อทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสของแต่ละอุณหภูมิที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกันคือที่ 0.6 โวลต์ จะมีค่าเท่ากับ 280 , 322 และ 400 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิในการเดินระบบ 60, 70, และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ



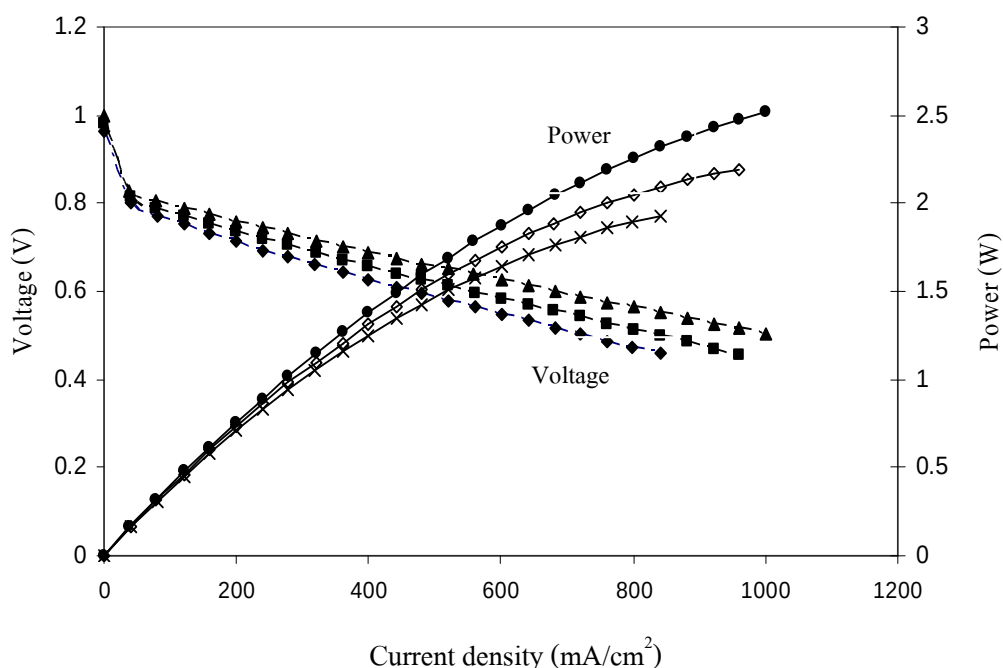
ภาพที่ 19 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (---◆--- ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C, ---■--- ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 70 °C, ---▲--- ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C, —×— กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C, —◇— กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 70 °C, —●— กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C)

เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรดังในภาพที่ 19 เมื่อทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสของแต่ละอุณหภูมิที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกันคือที่ 0.6 โวลต์ จะเห็นว่า ค่าความหนาแน่นกระแสจะมีค่าเท่ากับ 320 , 370 และ 441 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิในการเดินระบบ 60, 70, และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ



ภาพที่ 20 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ($-\diamond-$ ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C, $-\blacksquare-$ ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 70 °C, $-\blacktriangle-$ ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C, $-x-$ กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C, $-o-$ กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 70 °C, $-●-$ กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C)

เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรดังในภาพที่ 20 เมื่อทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสของแต่ละอุณหภูมิที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกันคือที่ 0.6 โวลต์ จะมีค่าเท่ากับ 340 , 400 และ 480 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิในการเดินระบบ 60, 70, และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ



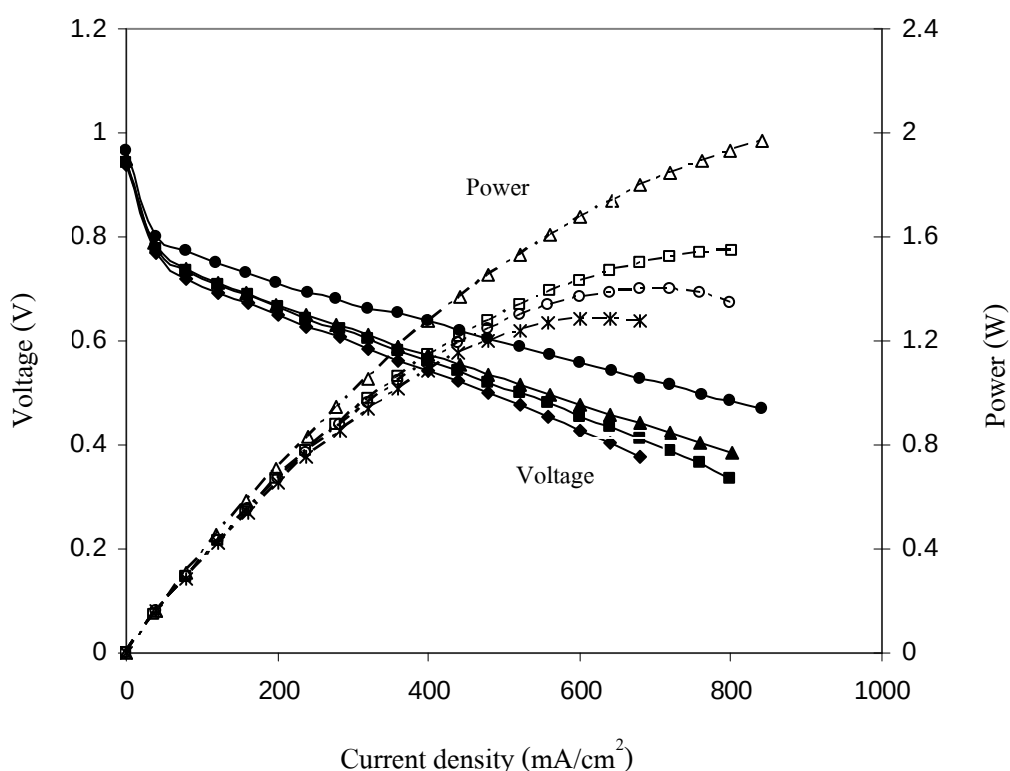
ภาพที่ 21 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ($--\diamond--$ ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C, $---\blacksquare---$ ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 70 °C, $---\blacktriangle---$ ศักย์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C, $---\times---$ กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C, $---\circ---$ กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 70 °C, $---\blacksquare---$ กำลังไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C)

เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรดังในภาพที่ 21 เมื่อทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสของแต่ละอุณหภูมิที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกันคือที่ 0.6 โวลต์ จะมีค่าเท่ากับ 480, 565 และ 681 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิในการเดินระบบ 60, 70, และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ

จากการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 60-80 องศาเซลเซียสโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 0.2-0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินระบบมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่อุณหภูมิในการเดินระบบที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะที่สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมีซึ่งมีการนำเอาผลของการแตกตัวทางปฏิกิริยาเคมีมาแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้เมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิในการเดินระบบสมรรถนะของเซลล์จะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีมีค่าสูงขึ้น

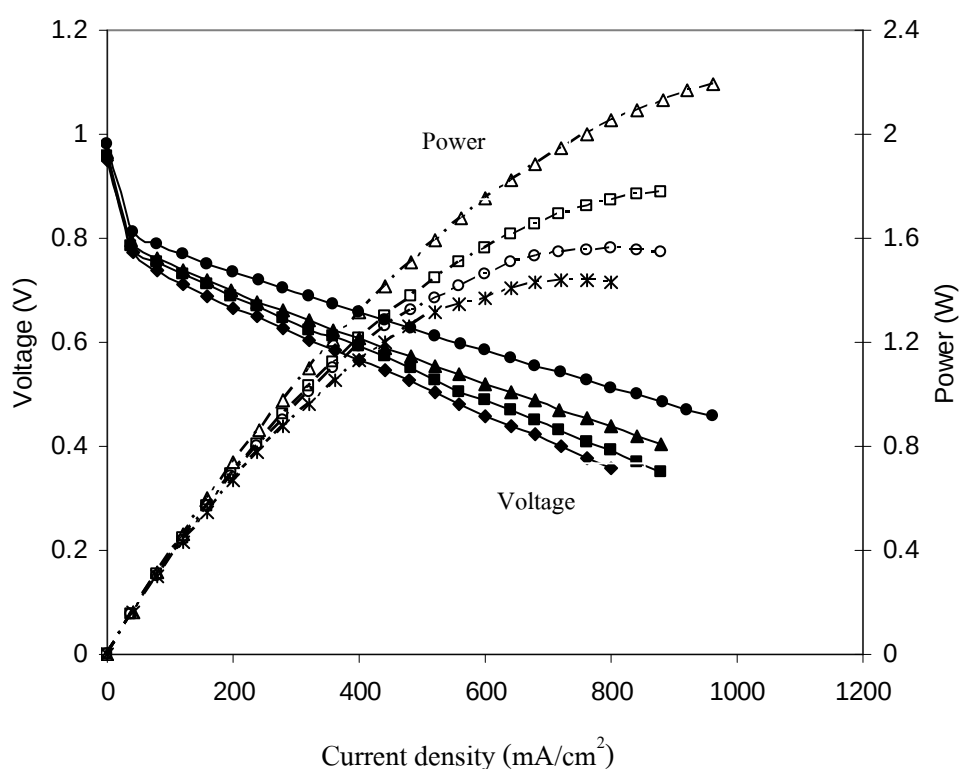
ในส่วนของการทดลองทำการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้อุณหภูมิในการเดินระบบคงที่ ได้พิจารณาจากเส้นโค้งโพลารไรเซชัน ซึ่งใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับและได้ผลดังภาพที่ 22-24



ภาพที่ 22 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน

โปรตอนเมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (---♦--- ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.2 mg/cm², —■— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.3 mg/cm², —▲— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.4 mg/cm², —●— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.6 mg/cm², —*— กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.2 mg/cm², —□— กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.3 mg/cm², —○— กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.4 mg/cm², - -▲- - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.6 mg/cm²)

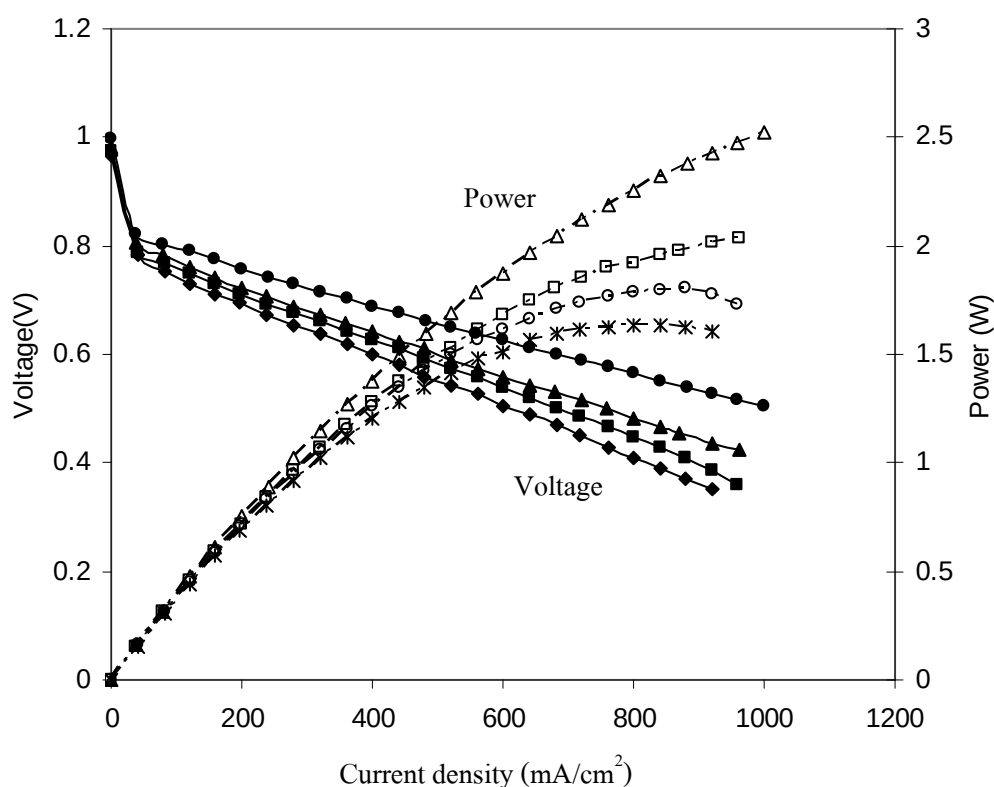
เมื่ออุณหภูมิในการเดินระบบคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียสดังแสดงในภาพที่ 22 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันที่ค่าความต่างศักย์ 0.6 โวลต์จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 282, 320, 340 และ 480 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 0.3 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 23 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน

โปรตอนเมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (—◆— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.2 mg/cm², —■— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.3 mg/cm², —▲— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.4 mg/cm², —●— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.6 mg/cm², - - * - - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.2 mg/cm², - - □ - - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.3 mg/cm², - - ▽ - - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.4 mg/cm², - - ✱ - - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.6 mg/cm²)

เมื่ออุณหภูมิในการเดินระบบคงที่ที่ 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 23 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันที่ค่าความต่างศักย์ 0.6 โวลต์จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 319, 380, 400 และ 540 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



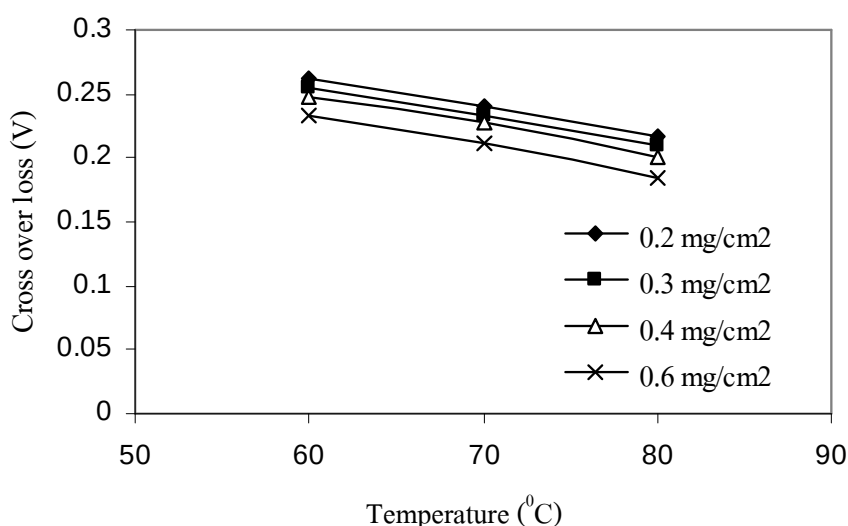
ภาพที่ 24 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน

โปรตอนเมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (—◆— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.2 mg/cm^2 , —■— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.3 mg/cm^2 , —▲— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.4 mg/cm^2 , —●— ศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.6 mg/cm^2 , - - ◆ - - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.2 mg/cm^2 , - - ■ - - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.3 mg/cm^2 , - - ▲ - - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.4 mg/cm^2 , - - ● - - กำลังไฟฟ้าเมื่อใช้ 0.6 mg/cm^2)

เมื่ออุณหภูมิในการเดินระบบคงที่ที่ 80 องศาเซลเซียสดังแสดงในภาพที่ 24 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันที่ค่าความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 400, 441, 480 และ 681 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองแปรเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา สรุปได้ว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นในทุกกรณี ในช่วงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2-0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และช่วงอุณหภูมิของเซลล์เป็น 60-80 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองดังแสดงด้วยเส้น โค้งโพลาริเซชันข้างต้นที่อุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ สามารถนำมาหาค่าการสูญเสียลดข้ามได้ โดยการหาผลต่างระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีและค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จริง ผลดังแสดงในภาพที่ 25



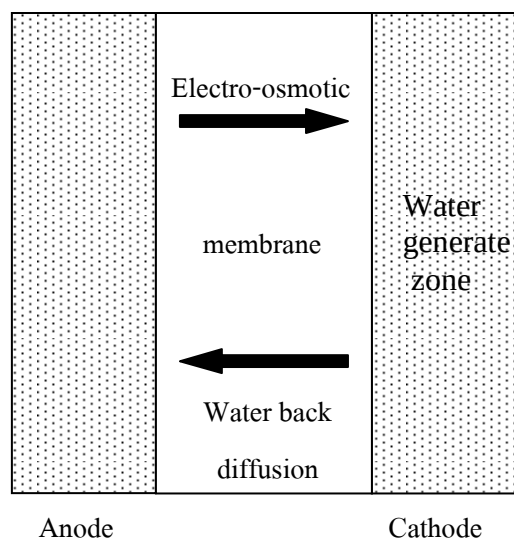
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียลดข้ามกับอุณหภูมิของเซลล์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

โดยค่าการสูญเสียลดข้ามมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (47) ดังนี้

$$\eta_{cross} = 1.062 - 7.489 \times 10^{-2} \times (L_{Pt}) - 2.35 \times 10^{-3} T \quad (47)$$

โดยที่ η_{cross} คือการสูญเสียลัดข้ามของอิเล็กตรอนหรือแก๊สเชื้อเพลิง (V)
 T คืออุณหภูมิในการเดินระบบ (K)
 L_{Pt} คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/cm^2)

จากความสัมพันธ์ข้างต้น จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียลัดข้ามในเซลล์เชื้อเพลิงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าค่าการสูญเสียลัดข้ามในเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลงเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น การสูญเสียลัดข้ามเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแก๊สเชื้อเพลิงและอิเล็กตรอนบางส่วนเคลื่อนที่ข้ามผ่านเมมเบรนจากแอโนดไปยังแคโทด จากกลไกการถ่ายโอนของสารดังแสดงในภาพที่ 26 จากภาพจะเห็นว่าน้ำที่เกิดขึ้นในส่วนของแคโทด จะมีการถ่ายโอนมายังด้านแอโนดโดยการแพร่กลับ (Water back diffusion) ซึ่งส่งผลให้เกิดการขัดขวางการแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิง อีกทั้งน้ำที่แพร่กลับจากแคโทดมายังแอโนดยังสามารถที่จะนำเอาอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาด้วยได้จึงเกิดการหักล้างระหว่างอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจากแอโนดไปยังแคโทดและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากแคโทดมายังแอโนด ทำให้การสูญเสียลัดข้ามเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิและ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงขึ้นด้วย ทำให้ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาในด้านแคโทดสูงขึ้น การขัดขวางการแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิงและมีการหักล้างของอิเล็กตรอนที่ลัดข้ามก็จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ส่งผลให้มีการสูญเสียลัดข้ามลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเดินระบบและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 26 กลไกการถ่ายโอนของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

การพิจารณาการสูญเสียกัมมันต์จะทำโดยอาศัยเส้นกราฟทาเฟลเพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนและค่าความชันทาเฟล เพื่อทำนายการลดลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการสูญเสียกัมมันต์ จากนั้นทำการหาค่าความต้านทานรวมของเซลล์โดยนำค่าการสูญเสียลัดข้ามและค่าการสูญเสียกัมมันต์หักออกจากค่าการสูญเสียทั้งหมด เพื่อนำมาทำนายค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากปัจจัยข้างต้น ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3 ค่าที่ได้จากผลการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

$T(^{\circ}\text{C})$	$E_{\text{Nernst}} (\text{V})$	$i_0 (\times 10^{-3} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	Tafel slope (V/dec)	$R_{\text{total}} (\text{ohm})$
60	1.199	2.022	0.0366	0.5185
70	1.191	4.785	0.0384	0.4905
80	1.182	8.976	0.0397	0.4469

ตารางที่ 4 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

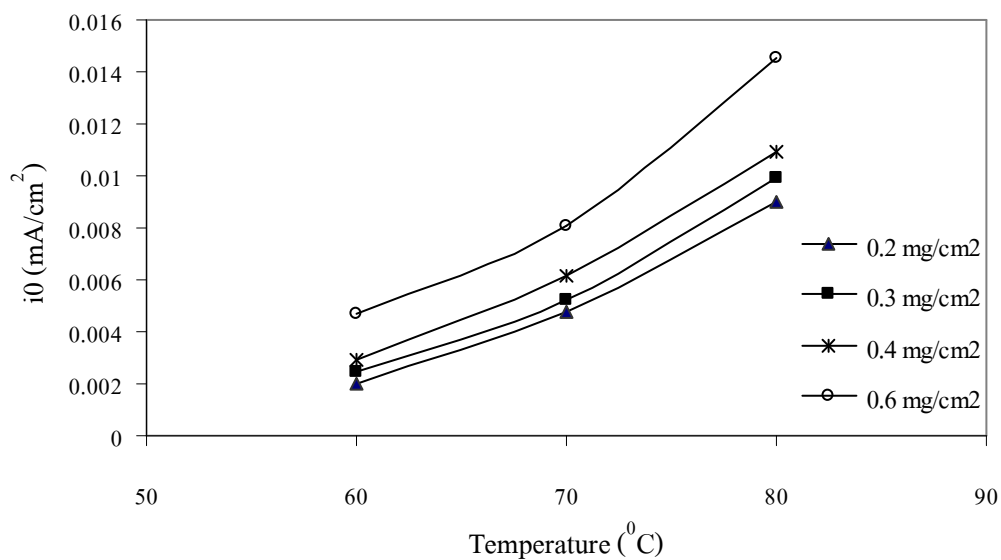
$T(^{\circ}\text{C})$	$E_{\text{nerst}}(\text{V})$	$i_0(\times 10^{-3} \text{ mA.cm}^{-2})$	Tafel slope (V/dec)	$R_{\text{total}}(\text{ohm})$
60	1.199	2.436	0.0368	0.492
70	1.191	5.237	0.0385	0.450
80	1.182	9.961	0.0398	0.401

ตารางที่ 5 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

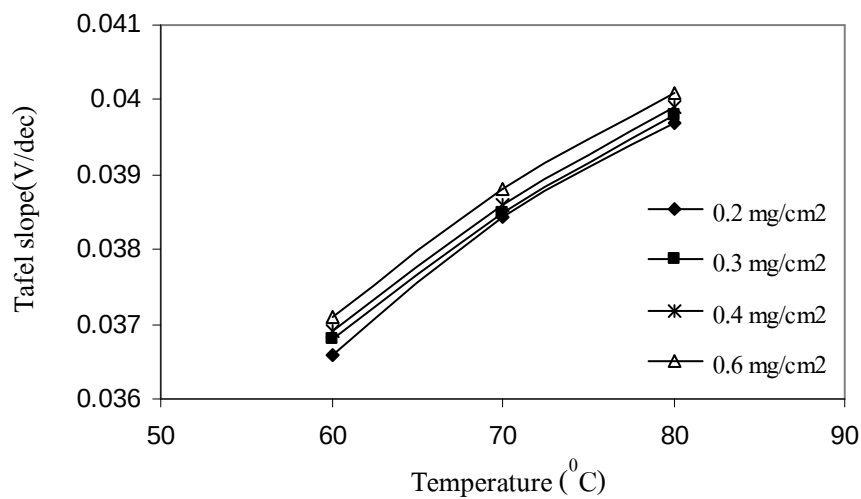
$T(^{\circ}\text{C})$	$E_{\text{nerst}}(\text{V})$	$i_0(\times 10^{-3} \text{ mA.cm}^{-2})$	Tafel slope (V/dec)	$R_{\text{total}}(\text{ohm})$
60	1.199	2.934	0.0369	0.449
70	1.191	6.153	0.0386	0.407
80	1.182	10.904	0.0399	0.363

ตารางที่ 6 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

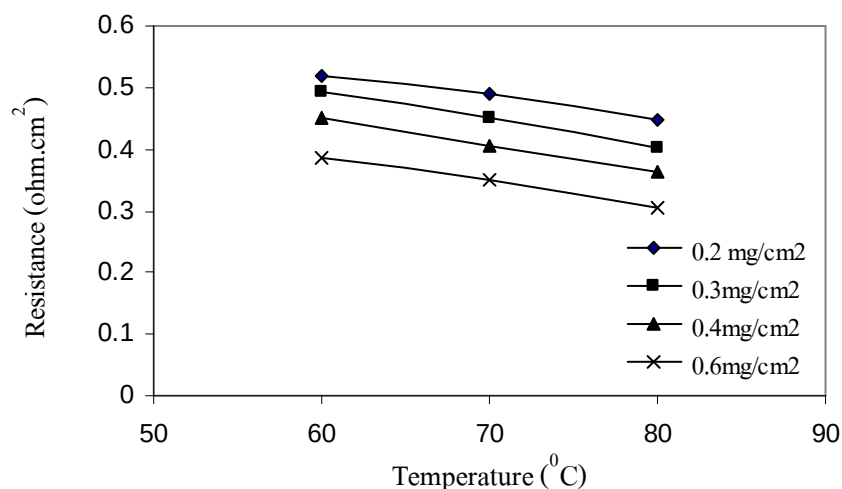
$T(^{\circ}\text{C})$	$E_{\text{nerst}}(\text{V})$	$i_0(\times 10^{-3} \text{ mA.cm}^{-2})$	Tafel slope (V/dec)	$R_{\text{total}}(\text{ohm})$
60	1.199	4.654	0.0371	0.385
70	1.191	8.056	0.0388	0.349
80	1.182	14.538	0.0401	0.306



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนกับอุณหภูมิของเซลล์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันทาเฟลกับอุณหภูมิของเซลล์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานรวมของเซลล์กับอุณหภูมิของเซลล์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน

จากตารางที่ 3-6 และภาพที่ 27 -29 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองในเซลล์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน ค่าความชันทาเฟล และค่าความต้านทานรวมของเซลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนจะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

$$i_0 = (7.657 \times 10^6) \exp\left(\frac{-7366}{T}\right) \exp(1.315 L_{Pt}) \quad (48)$$

โดยที่ i_0 คือ ค่าการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแส (mA/cm²)

T คือ อุณหภูมิในการเดินระบบ (K)

L_{Pt} คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/cm²)

จากสมการที่ (48) จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลง โดยเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงค่าคงที่ของปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นโดยมีความสัมพันธ์ในรูปแบบของเลขชี้กำลัง และค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นโดยมีความสัมพันธ์ในรูปแบบ

แบบของเลขชี้กำลังเช่นเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง 10 เคลวิน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนเพิ่มสูงขึ้นด้วย

ค่าความชันทาเพลจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาพที่ 28 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความชันทาเพลจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อค่าความชันทาเพลมากนัก ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ตามสมการที่(27) จากสมการจะเห็นได้ว่า ค่าความชันทาเพลจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากความความชันทาเพลจะแปรผันตรงกับค่าอุณหภูมิ แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อค่าความชันน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากสัดส่วนของสารประกอบภายในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อนำค่าความชันทาเพลที่ได้มาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กตรอนของปฏิกิริยา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับค่าอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ (49) ดังนี้

$$\alpha = 0.625 \exp\left(\frac{122}{T}\right) \exp(-2.721 \times 10^{-2} L_{Pt}) \quad (49)$$

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (27)$$

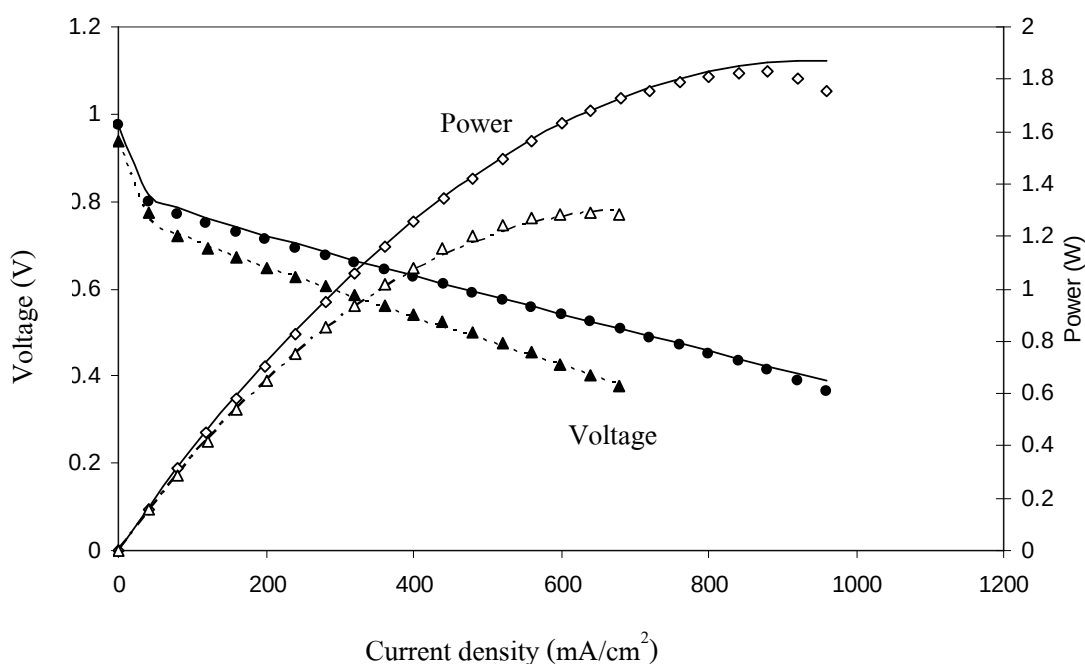
และส่วนสุดท้ายคือส่วนของการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์ โดยได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานรวม กับอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ดังสมการ

$$R = 15.09 \exp(-9.541 \times 10^{-3} T) \exp(-0.843 L_{Pt}) \quad (50)$$

ค่าความต้านทานรวมของเซลล์จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิ ตามสมการที่ (49) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าความต้านทานรวมของเซลล์จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นปฏิกิริยาสะดวกขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลดต่ำลง

ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ความต้านทานรวมของเซลล์ลดต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ความต้านทานของแกรไฟต์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำลดลง

เมื่อนำสมการของความสูญเสียต่างๆที่ได้จากข้างต้นมาใช้ในการทำนายสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยสมการทางทฤษฎีได้แก่สมการที่ (22), (24), และ (32), และค่าการสูญเสียต่างๆที่ได้จากสมการเอมไพริคัลดังสมการที่ (47), (48), (49) และ (50) พบว่าสามารถทำนายได้ค่อนข้างแม่นยำ ดังแสดงในภาพที่ 30 แต่จะมีข้อจำกัดในช่วงที่มีความหนาแน่นกระแสสูงๆ ทั้งนี้เนื่องจากว่าในการทำนายตามความสัมพันธ์ที่ได้นี้ไม่มีการรวมความสูญเสียการถ่ายโอนมวลเข้ามาด้วย



ภาพที่ 30 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ (เครื่องหมายแสดงค่าที่ได้จากการทดลอง และเส้นแสดงค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ โดย ▲ แทนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ ♦ แทนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการเดินระบบมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่วนนี้จะไปช่วยลดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสูญเสียกัมมันต์ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มในเรื่องการสัมผัสระหว่างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและคาร์บอนซึ่งส่งผลให้ค่าการนำทางไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นด้วย ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิในการเดินระบบของเซลล์ก็จะส่งผลให้ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นด้วยอีกเช่นกัน และเมื่อนำผลการทดลองมาทำการสร้างแบบความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะเห็นได้ว่า ค่าการสูญเสียลดต่ำลงเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง

$$\eta_{cross} = 1.062 - 7.489 \times 10^{-2} \times (L_{Pt}) - 2.35 \times 10^{-3} T \quad (47)$$

ส่วนค่าของการสูญเสียกัมมันต์ จะมีการแปรผันตามค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนซึ่งจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยผลจากการทดลอง แสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนได้ดังสมการ

$$i_0 = (7.657 \times 10^6) \exp\left(\frac{-7366}{T}\right) \exp(1.315 L_{Pt}) \quad (48)$$

โดยจากสมการค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนจะเห็นได้ว่า ทั้งอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนเพิ่มสูงขึ้นในรูปแบบของเลขชี้กำลัง

และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับค่าอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

$$\alpha = 0.625 \exp\left(\frac{122}{T}\right) \exp(-2.721 \times 10^{-2} L_{Pt}) \quad (49)$$

และสุดท้ายในส่วนของการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์ จะได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรวมของเซลล์กับอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ

$$R = 15.09 \exp(-9.541 \times 10^{-3} T) \exp(-0.843 L_{Pt}) \quad (50)$$

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่าค่าความต้านทานรวมของเซลล์จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลให้ค่าความต้านทานของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลดต่ำลงเนื่องมาจากอนุภาคของคาร์บอนอยู่ชิดกันมากขึ้นทำให้การถ่ายโอนของประจุเป็นไปได้สะดวก ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ค่าความต้านทานรวมของเซลล์ลดต่ำลงตามคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าพวกคาร์บอนและอิเล็กโทรไลต์

จากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถนำไปทำนายสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดี ซึ่งมีความผิดพลาด $\pm 1.4\%$ เนื่องจากยังไม่มีการรวมในส่วนของการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลเข้ามาด้วย ทั้งนี้ค่าคงที่ต่างๆในสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น องค์ประกอบของสารในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา และกรรมวิธีในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงความชำนาญเฉพาะตัวของผู้ประกอบเซลล์ซึ่งมีผลอย่างมากต่อค่าความสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นในตัวเซลล์เชื้อเพลิง

ข้อเสนอแนะ

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่เพียงแต่ปัจจัยของอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา หากทำการศึกษาผลของปัจจัยอื่นๆด้วย ก็จะสามารถทราบถึงกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้ละเอียดยิ่งขึ้น อีกทั้งในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงทุกจุดของการดีังกระแสนจะมีค่าการสูญเสียเกิดขึ้นในทุกรูปแบบ ดังนั้นถ้าหากมีการรวมการสูญเสียการถ่ายโอนมวลเข้ามาใช้ในการหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วย ผลของการทำนายสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ก็จะแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ศิริพรรณ นิลไพรัช. 2542. เซลล์เชื้อเพลิง แหล่งพลังงานสำหรับศตวรรษที่ 21. วารสารเทคโนโลยี
วัสดุ 2542 (14)

Berger, C. 1968. **Handbook of Fuel Cell Technology**. 1 ed. Prentice Hall, Engelwood Cliffs,
New Jersey.

Coppo, M, N.P. Siegel and M.R. Von Spakovsky. 2006. On the influence of temperature on
PEM fuel cell operation. **Journal of Power Sources**. 156: 560-569.

Fowler, A.J. and F.R. Foulkes. 2004. **Fuel Cell Handbook**. 7 ed. US Department of Energy

Fowler, M.W., R.F. Mann, J.C. Amphlett, B.A. Peppley and P.R. Roberge. 2002. Incorporation
of voltage degradation into a generalized steady state electrochemical for a PEM fuel
cell.. **Journal of Power Sources** 106: 274-283.

Hoogers, G. 2003. **Fuel cell technology handbook**. CRC press, Boca Raton, London, New
York, Washington D.C..

Kadjo, A.J.-J, P. Brault, A. Caillard, C. Coutanceau, J.-P. Garnier, and S. Martemianov. 2007.
Improvement of proton exchange membrane fuel cell electrical performance by
optimization of operation parameters and electrodes preparation.. **Journal of Power
Sources**. 172: 613-622.

Kordesch, K. and G. Simader. 1996. **Fuel Cells and Their Applications**. Weinheim, New York,
Basel, Cambridge, Tokyo.

- Larmini, J. and A. Dicks. 2000. **Fuel Cell Systems Explained**. John Wiley and sons, Ltd., Baffins Lane, Chichester, West Sussex, England.
- Litster, S. and G. Mclean. 2004. PEM fuel cell electrodes. **Journal of Power Sources** 130: 61-76.
- Maher, A.R. and S.A. Baghdadi. 2007. Modelling of Proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations. **J. Renewable energy** 30: 1587-1599.
- Mann, R.F., J.C. Amphlett, M. Hoopper, S.M. Jensen, B.A. Peppley, and R.P. Roberge. 1999. Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. **Journal of Power Sources** 86: 173-180.
- Raimundo, R.P., V.A. Paganin and E.A. Ticianelli. 2006. Studies of the performance of PEM fuel cell cathodes with the catalyst layer directly applied on Nafion membrane. **J. Electrochemica Acta** 51: 5236-5245.
- Sunny, E.I., B.M. Abu, H.K. Abdul Amir, R.W.D. Wan, and R. Chebbi. 2003. Improved membrane and electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells. **Journal of Power Sources** 114: 195-202.
- Terrance, W. 2000. Electrochemistry Transport, and Mechanistic Insight. **Proceeding of The fuel cell Technology Workshop**. King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Vielstich, W., H.A. Gasteiger and A. Ramm. 2003. **Handbook of fuel cells-Fundamentals Technology and Applications..** John Wiley and Sons Ltd., New York.
- Mccarron, T. 1999. **The Tafel Equation**. Tanner's. Available Source: <http://www.tannerm.com/Tafel.htm>, April 20, 2008.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.937	0	0	0.937	0	0	0.937	0	0	0.937	0	0
40	0.151	0.757	40	0.154	0.770	40	0.156	0.782	40	0.154	0.770	0.0025	0.0127
80	0.291	0.727	80	0.288	0.720	80	0.285	0.713	80	0.288	0.720	0.0028	0.0071
120	0.419	0.699	120	0.416	0.693	120	0.412	0.687	120	0.416	0.693	0.0036	0.0060
160	0.539	0.674	160	0.539	0.673	160	0.538	0.673	160	0.539	0.673	0.0004	0.0005
200	0.650	0.650	200	0.648	0.648	200	0.647	0.647	200	0.648	0.648	0.0017	0.0017
240	0.754	0.628	240	0.754	0.629	240	0.755	0.629	240	0.754	0.629	0.0006	0.0005
280	0.845	0.604	280	0.848	0.606	280	0.851	0.608	280	0.848	0.606	0.0032	0.0023
320	0.931	0.582	320	0.937	0.585	320	0.942	0.589	320	0.937	0.585	0.0052	0.0033
360	1.007	0.559	360	1.014	0.563	360	1.020	0.567	360	1.014	0.563	0.0067	0.0037
400	1.076	0.538	400	1.081	0.540	400	1.086	0.543	400	1.081	0.540	0.0051	0.0025
440	1.136	0.517	440	1.154	0.524	440	1.171	0.532	440	1.154	0.524	0.0171	0.0078
480	1.188	0.495	480	1.203	0.501	480	1.218	0.507	480	1.203	0.501	0.0152	0.0063
520	1.229	0.473	520	1.240	0.477	520	1.251	0.481	520	1.240	0.477	0.0109	0.0042
560	1.265	0.452	560	1.269	0.453	560	1.274	0.455	560	1.269	0.453	0.0044	0.0016
600	1.289	0.430	600	1.284	0.428	600	1.278	0.426	600	1.284	0.428	0.0055	0.0018
640	1.307	0.408	640	1.288	0.403	640	1.269	0.397	640	1.288	0.403	0.0186	0.0058
680	1.316	0.387	680	1.280	0.377	680	1.245	0.366	680	1.280	0.377	0.0355	0.0104

ตารางผนวกที่ 2 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.950	0	0	0.950	0	0	0.949	0	0	0.950	0	0.0006
40	0.155	0.773	40	0.155	0.773	40	0.155	0.774	40	0.157	0.773	0.0001	0.0006
80	0.295	0.738	80	0.295	0.738	80	0.291	0.728	80	0.295	0.734	0.0023	0.0058
120	0.428	0.713	120	0.428	0.713	120	0.422	0.703	120	0.426	0.710	0.0035	0.0058
160	0.550	0.687	160	0.550	0.687	160	0.542	0.677	160	0.547	0.684	0.0046	0.0058
200	0.664	0.664	200	0.664	0.664	200	0.659	0.659	200	0.664	0.662	0.0029	0.0029
240	0.778	0.648	240	0.778	0.648	240	0.773	0.644	240	0.774	0.647	0.0028	0.0023
280	0.877	0.626	280	0.877	0.626	280	0.863	0.616	280	0.873	0.623	0.0081	0.0058
320	0.967	0.604	320	0.967	0.604	320	0.954	0.596	320	0.961	0.602	0.0074	0.0046
360	1.050	0.583	360	1.050	0.583	360	1.032	0.573	360	1.046	0.580	0.0104	0.0058
400	1.130	0.565	400	1.130	0.565	400	1.110	0.555	400	1.125	0.562	0.0115	0.0058
440	1.204	0.547	440	1.204	0.547	440	1.193	0.542	440	1.200	0.545	0.0064	0.0029
480	1.261	0.525	480	1.261	0.525	480	1.244	0.518	480	1.256	0.523	0.0097	0.0040
520	1.314	0.505	520	1.314	0.505	520	1.296	0.498	520	1.309	0.503	0.0105	0.0040
560	1.345	0.481	560	1.345	0.481	560	1.315	0.470	560	1.333	0.477	0.0178	0.0064
600	1.375	0.458	600	1.375	0.458	600	1.354	0.451	600	1.366	0.456	0.0121	0.0040
640	1.408	0.440	640	1.408	0.440	640	1.376	0.430	640	1.398	0.437	0.0185	0.0058
680	1.432	0.421	680	1.432	0.421	680	1.398	0.411	680	1.420	0.418	0.0196	0.0058
720	1.440	0.400	720	1.440	0.400	720	1.429	0.397	720	1.438	0.399	0.0062	0.0017
760	1.435	0.378	760	1.435	0.378	760	1.402	0.369	760	1.427	0.375	0.0190	0.0050
800	1.425	0.356	800	1.425	0.356	800	1.385	0.346	800	1.413	0.353	0.0231	0.0058

ตารางผนวกที่ 3 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.965	0	0	0.965	0	0	0.965	0	0	0.965	0	0
40	0.159	0.795	40	0.160	0.798	40	0.152	0.759	40	0.157	0.784	0.0044	0.0215
80	0.310	0.765	80	0.307	0.768	80	0.291	0.728	80	0.305	0.753	0.0101	0.0222
120	0.443	0.741	120	0.446	0.744	120	0.425	0.708	120	0.437	0.731	0.0117	0.0201
160	0.574	0.718	160	0.577	0.721	160	0.557	0.696	160	0.569	0.712	0.0108	0.0136
200	0.690	0.698	200	0.701	0.701	200	0.687	0.687	200	0.688	0.695	0.0070	0.0070
240	0.808	0.676	240	0.815	0.679	240	0.801	0.667	240	0.806	0.674	0.0072	0.0063
280	0.919	0.656	280	0.922	0.659	280	0.913	0.652	280	0.919	0.655	0.0048	0.0033
320	1.018	0.636	320	1.022	0.639	320	1.019	0.637	320	1.020	0.637	0.0021	0.0015
360	1.110	0.616	360	1.114	0.619	360	1.120	0.622	360	1.116	0.619	0.0052	0.0032
400	1.195	0.597	400	1.199	0.600	400	1.218	0.609	400	1.205	0.602	0.0122	0.0064
440	1.273	0.577	440	1.276	0.580	440	1.284	0.584	440	1.280	0.580	0.0058	0.0034
480	1.342	0.558	480	1.347	0.561	480	1.342	0.559	480	1.345	0.559	0.0028	0.0015
520	1.404	0.539	520	1.410	0.542	520	1.430	0.550	520	1.417	0.544	0.0136	0.0056
560	1.459	0.520	560	1.466	0.523	560	1.516	0.541	560	1.481	0.528	0.0310	0.0113
600	1.507	0.502	600	1.514	0.505	600	1.512	0.504	600	1.513	0.503	0.0033	0.0016
640	1.548	0.483	640	1.555	0.486	640	1.585	0.495	640	1.565	0.488	0.0200	0.0066
680	1.581	0.464	680	1.588	0.467	680	1.612	0.474	680	1.596	0.468	0.0160	0.0051
720	1.606	0.447	720	1.617	0.450	720	1.628	0.453	720	1.617	0.450	0.0113	0.0031
760	1.626	0.427	760	1.637	0.430	760	1.623	0.427	760	1.629	0.428	0.0075	0.0020
800	1.637	0.409	800	1.649	0.412	800	1.628	0.407	800	1.638	0.409	0.0109	0.0027
840	1.642	0.391	840	1.655	0.394	840	1.599	0.380	840	1.632	0.388	0.0292	0.0070
880	1.639	0.373	880	1.653	0.376	880	1.591	0.362	880	1.628	0.370	0.0323	0.0073
920	1.630	0.354	920	1.643	0.357	920	1.555	0.338	920	1.609	0.350	0.0476	0.0103

ตารางผนวกที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.944	0	0	0.947	0	0	0.941	0	0	0.944	0	0.0030
40	0.153	0.767	40	0.156	0.779	40	0.156	0.782	40	0.155	0.776	0.0016	0.0082
80	0.295	0.737	80	0.295	0.738	80	0.292	0.730	80	0.294	0.735	0.0018	0.0045
120	0.426	0.710	120	0.427	0.711	120	0.421	0.702	120	0.425	0.708	0.0029	0.0049
160	0.549	0.687	160	0.552	0.690	160	0.548	0.685	160	0.550	0.687	0.0021	0.0027
200	0.664	0.664	200	0.668	0.668	200	0.663	0.663	200	0.665	0.665	0.0026	0.0026
240	0.771	0.642	240	0.774	0.645	240	0.767	0.639	240	0.771	0.642	0.0038	0.0032
280	0.867	0.619	280	0.875	0.625	280	0.870	0.621	280	0.870	0.622	0.0040	0.0029
320	0.958	0.599	320	0.968	0.605	320	0.964	0.602	320	0.963	0.602	0.0052	0.0032
360	1.038	0.577	360	1.052	0.585	360	1.050	0.583	360	1.047	0.582	0.0076	0.0042
400	1.113	0.556	400	1.128	0.564	400	1.125	0.563	400	1.122	0.561	0.0083	0.0041
440	1.179	0.536	440	1.203	0.547	440	1.207	0.549	440	1.196	0.544	0.0151	0.0069
480	1.236	0.515	480	1.258	0.524	480	1.257	0.524	480	1.250	0.521	0.0122	0.0051
520	1.284	0.494	520	1.308	0.503	520	1.309	0.503	520	1.300	0.500	0.0139	0.0053
560	1.327	0.474	560	1.350	0.482	560	1.349	0.482	560	1.342	0.479	0.0131	0.0047
600	1.359	0.453	600	1.376	0.459	600	1.366	0.455	600	1.367	0.456	0.0086	0.0029
640	1.384	0.433	640	1.397	0.437	640	1.381	0.432	640	1.388	0.434	0.0084	0.0026
680	1.402	0.412	680	1.410	0.415	680	1.388	0.408	680	1.400	0.412	0.0111	0.0033
720	1.411	0.392	720	1.412	0.392	720	1.380	0.383	720	1.401	0.389	0.0180	0.0050
760	1.412	0.372	760	1.397	0.368	760	1.346	0.354	760	1.385	0.365	0.0345	0.0091
800	1.406	0.352	800	1.354	0.339	800	1.267	0.317	800	1.342	0.336	0.0705	0.0176

ตารางผนวกที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.965	0	0	0.968	0	0	0.962	0	0	0.965	0	0.0026
40	0.157	0.786	40	0.156	0.779	40	0.158	0.787	40	0.157	0.784	0.0011	0.0041
80	0.302	0.755	80	0.300	0.749	80	0.314	0.756	80	0.305	0.753	0.0077	0.0039
120	0.440	0.733	120	0.437	0.729	120	0.435	0.731	120	0.437	0.731	0.0025	0.0021
160	0.571	0.714	160	0.571	0.713	160	0.566	0.709	160	0.569	0.712	0.0029	0.0028
200	0.697	0.697	200	0.701	0.701	200	0.665	0.687	200	0.688	0.695	0.0198	0.0072
240	0.812	0.676	240	0.818	0.681	240	0.789	0.666	240	0.806	0.674	0.0151	0.0081
280	0.920	0.657	280	0.929	0.664	280	0.907	0.645	280	0.919	0.655	0.0113	0.0096
320	1.022	0.639	320	1.038	0.649	320	0.999	0.623	320	1.020	0.637	0.0196	0.0131
360	1.118	0.621	360	1.138	0.632	360	1.091	0.604	360	1.116	0.619	0.0240	0.0143
400	1.207	0.604	400	1.235	0.617	400	1.173	0.584	400	1.205	0.602	0.0311	0.0167
440	1.281	0.582	440	1.308	0.595	440	1.251	0.564	440	1.280	0.580	0.0287	0.0155
480	1.347	0.561	480	1.374	0.572	480	1.314	0.544	480	1.345	0.559	0.0298	0.0141
520	1.419	0.546	520	1.458	0.561	520	1.373	0.525	520	1.417	0.544	0.0425	0.0179
560	1.485	0.530	560	1.536	0.549	560	1.423	0.506	560	1.481	0.528	0.0569	0.0214
600	1.516	0.505	600	1.553	0.518	600	1.468	0.487	600	1.513	0.503	0.0427	0.0156
640	1.568	0.490	640	1.622	0.507	640	1.504	0.467	640	1.565	0.488	0.0589	0.0198
680	1.599	0.470	680	1.653	0.486	680	1.535	0.449	680	1.596	0.468	0.0589	0.0189
720	1.626	0.452	720	1.683	0.467	720	1.542	0.430	720	1.617	0.450	0.0712	0.0188
760	1.635	0.430	760	1.688	0.444	760	1.564	0.410	760	1.629	0.428	0.0622	0.0171
800	1.646	0.411	800	1.701	0.425	800	1.567	0.392	800	1.638	0.409	0.0670	0.0167
840	1.640	0.390	840	1.688	0.402	840	1.567	0.373	840	1.632	0.388	0.0613	0.0146
880	1.637	0.372	880	1.690	0.384	880	1.557	0.354	880	1.628	0.370	0.0671	0.0153

ตารางผนวกที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.973	0	0	0.972	0	0	0.974	0	0	0.973	0	0.0010
40	0.156	0.780	40	0.159	0.796	40	0.157	0.784	40	0.157	0.787	0.0017	0.0083
80	0.301	0.751	80	0.308	0.770	80	0.313	0.784	80	0.307	0.768	0.0064	0.0161
120	0.438	0.729	120	0.449	0.748	120	0.460	0.767	120	0.449	0.748	0.0114	0.0190
160	0.567	0.708	160	0.582	0.727	160	0.602	0.753	160	0.584	0.729	0.0180	0.0225
200	0.689	0.689	200	0.709	0.709	200	0.734	0.734	200	0.711	0.711	0.0225	0.0225
240	0.804	0.670	240	0.828	0.690	240	0.862	0.718	240	0.831	0.693	0.0292	0.0243
280	0.911	0.651	280	0.939	0.671	280	0.992	0.708	280	0.947	0.677	0.0409	0.0292
320	1.012	0.633	320	1.044	0.653	320	1.111	0.694	320	1.056	0.660	0.0502	0.0314
360	1.107	0.615	360	1.143	0.635	360	1.225	0.680	360	1.158	0.643	0.0604	0.0336
400	1.194	0.597	400	1.234	0.617	400	1.337	0.669	400	1.255	0.628	0.0738	0.0369
440	1.275	0.580	440	1.319	0.600	440	1.431	0.650	440	1.342	0.610	0.0805	0.0366
480	1.350	0.562	480	1.398	0.582	480	1.511	0.630	480	1.420	0.592	0.0831	0.0346
520	1.418	0.545	520	1.470	0.565	520	1.592	0.612	520	1.493	0.574	0.0892	0.0343
560	1.479	0.528	560	1.535	0.548	560	1.673	0.598	560	1.563	0.558	0.0998	0.0356
600	1.534	0.511	600	1.594	0.531	600	1.706	0.569	600	1.611	0.537	0.0874	0.0291
640	1.582	0.494	640	1.646	0.514	640	1.758	0.549	640	1.662	0.519	0.0889	0.0278
680	1.624	0.478	680	1.692	0.498	680	1.794	0.528	680	1.703	0.501	0.0858	0.0252
720	1.663	0.462	720	1.735	0.482	720	1.828	0.508	720	1.742	0.484	0.0830	0.0230
760	1.689	0.445	760	1.765	0.465	760	1.849	0.487	760	1.768	0.465	0.0799	0.0210
800	1.713	0.428	800	1.793	0.448	800	1.860	0.465	800	1.789	0.447	0.0739	0.0185
840	1.729	0.412	840	1.813	0.432	840	1.851	0.441	840	1.797	0.428	0.0624	0.0149
880	1.740	0.395	880	1.828	0.415	880	1.847	0.420	880	1.805	0.410	0.0571	0.0130
920	1.742	0.379	920	1.802	0.392	920	1.785	0.388	920	1.776	0.386	0.0309	0.0067

ตารางผนวกที่ 7 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.951	0	0	0.952	0	0	0.950	0	0	0.951	0	0.0009
40	0.154	0.771	40	0.158	0.788	40	0.160	0.802	40	0.157	0.787	0.0031	0.0155
80	0.296	0.740	80	0.296	0.741	80	0.293	0.733	80	0.295	0.738	0.0016	0.0039
120	0.429	0.715	120	0.432	0.719	120	0.423	0.705	120	0.428	0.713	0.0044	0.0074
160	0.555	0.694	160	0.557	0.696	160	0.549	0.687	160	0.554	0.692	0.0039	0.0049
200	0.672	0.672	200	0.673	0.673	200	0.668	0.668	200	0.671	0.671	0.0030	0.0030
240	0.782	0.652	240	0.781	0.651	240	0.778	0.649	240	0.780	0.650	0.0019	0.0016
280	0.884	0.632	280	0.881	0.629	280	0.882	0.630	280	0.883	0.630	0.0016	0.0011
320	0.978	0.611	320	0.973	0.608	320	0.978	0.612	320	0.976	0.610	0.0033	0.0021
360	1.064	0.591	360	1.057	0.587	360	1.067	0.593	360	1.063	0.590	0.0052	0.0029
400	1.144	0.572	400	1.132	0.566	400	1.151	0.576	400	1.143	0.571	0.0095	0.0047
440	1.216	0.553	440	1.199	0.545	440	1.229	0.559	440	1.215	0.552	0.0150	0.0068
480	1.282	0.534	480	1.261	0.526	480	1.300	0.542	480	1.281	0.534	0.0194	0.0081
520	1.340	0.515	520	1.326	0.510	520	1.352	0.520	520	1.339	0.515	0.0127	0.0049
560	1.389	0.496	560	1.385	0.495	560	1.393	0.497	560	1.389	0.496	0.0039	0.0014
600	1.433	0.478	600	1.440	0.480	600	1.426	0.475	600	1.433	0.478	0.0068	0.0023
640	1.468	0.459	640	1.487	0.465	640	1.452	0.454	640	1.469	0.459	0.0179	0.0056
680	1.497	0.440	680	1.530	0.450	680	1.469	0.432	680	1.499	0.441	0.0307	0.0090
720	1.522	0.423	720	1.568	0.436	720	1.483	0.412	720	1.524	0.423	0.0427	0.0119
760	1.533	0.403	760	1.599	0.421	760	1.476	0.388	760	1.536	0.404	0.0617	0.0162
800	1.539	0.385	800	1.625	0.406	800	1.466	0.367	800	1.543	0.386	0.0793	0.0198

ตารางผนวกที่ 8 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.965	0	0	0.967	0	0	0.964	0	0	0.965	0	0.0014
40	0.158	0.789	40	0.159	0.793	40	0.162	0.808	40	0.159	0.797	0.0020	0.0099
80	0.304	0.760	80	0.304	0.761	80	0.304	0.760	80	0.304	0.760	0.0001	0.0003
120	0.443	0.738	120	0.441	0.734	120	0.445	0.741	120	0.443	0.738	0.0020	0.0033
160	0.574	0.717	160	0.573	0.716	160	0.575	0.719	160	0.574	0.717	0.0010	0.0013
200	0.698	0.698	200	0.698	0.698	200	0.699	0.699	200	0.698	0.698	0.0003	0.0003
240	0.815	0.679	240	0.817	0.681	240	0.812	0.677	240	0.815	0.679	0.0023	0.0019
280	0.925	0.660	280	0.930	0.664	280	0.919	0.656	280	0.925	0.660	0.0057	0.0041
320	1.026	0.641	320	1.037	0.648	320	1.015	0.634	320	1.026	0.641	0.0111	0.0069
360	1.123	0.624	360	1.138	0.632	360	1.109	0.616	360	1.123	0.624	0.0144	0.0080
400	1.213	0.606	400	1.222	0.611	400	1.204	0.602	400	1.213	0.606	0.0094	0.0047
440	1.295	0.589	440	1.309	0.595	440	1.281	0.582	440	1.295	0.589	0.0141	0.0064
480	1.371	0.571	480	1.381	0.576	480	1.362	0.567	480	1.371	0.571	0.0098	0.0041
520	1.441	0.554	520	1.443	0.555	520	1.439	0.553	520	1.441	0.554	0.0020	0.0008
560	1.505	0.538	560	1.497	0.535	560	1.514	0.541	560	1.505	0.538	0.0085	0.0030
600	1.562	0.521	600	1.545	0.515	600	1.579	0.526	600	1.562	0.521	0.0171	0.0057
640	1.611	0.503	640	1.583	0.495	640	1.638	0.512	640	1.611	0.503	0.0275	0.0086
680	1.656	0.487	680	1.632	0.480	680	1.680	0.494	680	1.656	0.487	0.0236	0.0069
720	1.695	0.471	720	1.676	0.466	720	1.713	0.476	720	1.695	0.471	0.0183	0.0051
760	1.722	0.453	760	1.713	0.451	760	1.731	0.456	760	1.722	0.453	0.0087	0.0023
800	1.748	0.437	800	1.745	0.436	800	1.751	0.438	800	1.748	0.437	0.0033	0.0008
840	1.766	0.420	840	1.770	0.421	840	1.762	0.419	840	1.766	0.420	0.0041	0.0010

ตารางผนวกที่ 9 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.98274	0	0	0.982	0	0	0.981	0	0	0.982	0	0.0010
40	0.161	0.806	40	0.162	0.808	40	0.160	0.801	40	0.161	0.805	0.0008	0.0038
80	0.314	0.784	80	0.312	0.781	80	0.314	0.784	80	0.313	0.783	0.0008	0.0019
120	0.457	0.762	120	0.456	0.759	120	0.456	0.761	120	0.456	0.761	0.0006	0.0011
160	0.594	0.743	160	0.593	0.741	160	0.593	0.741	160	0.593	0.742	0.0007	0.0009
200	0.724	0.724	200	0.723	0.723	200	0.722	0.722	200	0.723	0.723	0.0010	0.0010
240	0.848	0.706	240	0.847	0.706	240	0.845	0.704	240	0.847	0.705	0.0014	0.0012
280	0.966	0.690	280	0.965	0.689	280	0.962	0.687	280	0.964	0.689	0.0019	0.0014
320	1.077	0.673	320	1.077	0.673	320	1.073	0.670	320	1.075	0.672	0.0024	0.0015
360	1.183	0.657	360	1.183	0.657	360	1.178	0.654	360	1.181	0.656	0.0028	0.0016
400	1.283	0.641	400	1.282	0.641	400	1.277	0.638	400	1.281	0.640	0.0032	0.0016
440	1.375	0.625	440	1.375	0.625	440	1.369	0.622	440	1.373	0.624	0.0036	0.0016
480	1.466	0.611	480	1.465	0.611	480	1.459	0.608	480	1.463	0.610	0.0039	0.0016
520	1.535	0.590	520	1.547	0.595	520	1.514	0.582	520	1.532	0.589	0.0166	0.0064
560	1.610	0.575	560	1.623	0.580	560	1.588	0.567	560	1.607	0.574	0.0177	0.0063
600	1.681	0.560	600	1.695	0.565	600	1.658	0.553	600	1.678	0.559	0.0188	0.0063
640	1.745	0.545	640	1.759	0.550	640	1.720	0.538	640	1.741	0.544	0.0197	0.0062
680	1.804	0.531	680	1.819	0.535	680	1.778	0.523	680	1.801	0.530	0.0206	0.0061
720	1.858	0.516	720	1.874	0.521	720	1.832	0.509	720	1.855	0.515	0.0215	0.0060
760	1.906	0.502	760	1.922	0.506	760	1.879	0.494	760	1.902	0.501	0.0222	0.0058
800	1.928	0.482	800	1.965	0.491	800	1.880	0.470	800	1.924	0.481	0.0427	0.0107
840	1.963	0.467	840	2.001	0.476	840	1.913	0.455	840	1.959	0.466	0.0442	0.0105
880	2.008	0.456	880	2.048	0.465	880	1.956	0.445	880	2.004	0.455	0.0458	0.0104
920	2.016	0.438	920	2.056	0.447	920	1.962	0.427	920	2.011	0.437	0.0470	0.0102

ตารางผนวกที่ 10 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.965	0	0	0.962	0	0	0.969	0	0	0.965	0	0.0037
40	0.16	0.800	40	0.160	0.798	40	0.161	0.802	40	0.160	0.800	0.0004	0.0021
80	0.31	0.775	80	0.308	0.771	80	0.309	0.773	80	0.309	0.773	0.0009	0.0022
120	0.45	0.754	120	0.450	0.749	120	0.450	0.749	120	0.451	0.751	0.0017	0.0029
160	0.59	0.736	160	0.585	0.731	160	0.582	0.728	160	0.585	0.732	0.0034	0.0042
200	0.72	0.718	200	0.713	0.713	200	0.707	0.707	200	0.713	0.713	0.0057	0.0057
240	0.84	0.701	240	0.835	0.696	240	0.823	0.686	240	0.833	0.694	0.0093	0.0077
280	0.96	0.685	280	0.951	0.679	280	0.946	0.676	280	0.952	0.680	0.0063	0.0045
320	1.07	0.668	320	1.061	0.663	320	1.049	0.655	320	1.059	0.662	0.0101	0.0063
360	1.17	0.651	360	1.165	0.647	360	1.188	0.660	360	1.175	0.653	0.0121	0.0067
400	1.27	0.636	400	1.262	0.631	400	1.286	0.643	400	1.273	0.637	0.0119	0.0059
440	1.36	0.619	440	1.353	0.615	440	1.376	0.625	440	1.364	0.620	0.0115	0.0052
480	1.45	0.604	480	1.441	0.601	480	1.463	0.610	480	1.451	0.605	0.0111	0.0046
520	1.53	0.588	520	1.521	0.585	520	1.543	0.593	520	1.531	0.589	0.0111	0.0043
560	1.60	0.573	560	1.595	0.570	560	1.621	0.579	560	1.607	0.574	0.0132	0.0047
600	1.67	0.558	600	1.665	0.555	600	1.689	0.563	600	1.676	0.559	0.0122	0.0041
640	1.73	0.542	640	1.727	0.540	640	1.748	0.546	640	1.737	0.543	0.0107	0.0033
680	1.79	0.527	680	1.785	0.525	680	1.807	0.532	680	1.795	0.528	0.0113	0.0033
720	1.85	0.513	720	1.838	0.511	720	1.863	0.517	720	1.849	0.514	0.0125	0.0035
760	1.89	0.497	760	1.884	0.496	760	1.902	0.501	760	1.891	0.498	0.0094	0.0025
800	1.93	0.482	800	1.925	0.481	800	1.947	0.487	800	1.934	0.483	0.0119	0.0030
840	1.96	0.467	840	1.959	0.466	840	1.978	0.471	840	1.966	0.468	0.0105	0.0025

ตารางผนวกที่ 11 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.979	0	0	0.983	0	0	0.976	0	0	0.979	0	0.0038
40	0.164	0.820	40	0.162	0.809	40	0.160	0.802	40	0.162	0.810	0.0018	0.0092
80	0.318	0.795	80	0.316	0.791	80	0.310	0.775	80	0.315	0.787	0.0042	0.0105
120	0.465	0.775	120	0.462	0.770	120	0.459	0.764	120	0.462	0.770	0.0031	0.0052
160	0.605	0.757	160	0.605	0.756	160	0.594	0.742	160	0.601	0.752	0.0064	0.0080
200	0.740	0.740	200	0.735	0.735	200	0.729	0.729	200	0.735	0.735	0.0053	0.0053
240	0.868	0.723	240	0.862	0.718	240	0.856	0.713	240	0.862	0.718	0.0059	0.0050
280	0.991	0.708	280	0.982	0.702	280	0.979	0.699	280	0.984	0.703	0.0063	0.0045
320	1.107	0.692	320	1.100	0.687	320	1.091	0.682	320	1.099	0.687	0.0081	0.0051
360	1.218	0.677	360	1.213	0.674	360	1.197	0.665	360	1.209	0.672	0.0113	0.0063
400	1.324	0.662	400	1.322	0.661	400	1.295	0.648	400	1.314	0.657	0.0159	0.0080
440	1.422	0.647	440	1.414	0.643	440	1.398	0.635	440	1.411	0.642	0.0124	0.0056
480	1.517	0.632	480	1.514	0.631	480	1.483	0.618	480	1.505	0.627	0.0187	0.0078
520	1.605	0.617	520	1.608	0.618	520	1.563	0.601	520	1.592	0.612	0.0253	0.0097
560	1.687	0.602	560	1.695	0.605	560	1.637	0.585	560	1.673	0.597	0.0312	0.0111
600	1.766	0.589	600	1.768	0.589	600	1.719	0.573	600	1.751	0.584	0.0276	0.0092
640	1.836	0.574	640	1.855	0.580	640	1.769	0.553	640	1.820	0.569	0.0452	0.0141
680	1.906	0.561	680	1.912	0.562	680	1.849	0.544	680	1.889	0.556	0.0349	0.0103
720	1.965	0.546	720	1.974	0.548	720	1.903	0.529	720	1.947	0.541	0.0389	0.0108
760	2.019	0.531	760	2.032	0.535	760	1.950	0.513	760	2.000	0.526	0.0444	0.0117
800	2.071	0.518	800	2.084	0.521	800	1.998	0.499	800	2.051	0.513	0.0463	0.0116
840	2.115	0.504	840	2.137	0.509	840	2.030	0.483	840	2.094	0.499	0.0563	0.0134
880	2.153	0.489	880	2.180	0.495	880	2.059	0.468	880	2.131	0.484	0.0631	0.0143
920	2.186	0.475	920	2.219	0.482	920	2.084	0.453	920	2.163	0.470	0.0701	0.0152

ตารางผนวกที่ 12 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ค่าเฉลี่ย			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	I (mA/cm ²)	Power (W)	E (V)	Power (W)	E (V)
0	0	0.996	0	0	0.998	0	0	0.994	0	0	0.996	0	0.0020
40	0.168	0.838	40	0.165	0.824	40	0.161	0.803	40	0.164	0.822	0.0035	0.0174
80	0.325	0.813	80	0.322	0.806	80	0.317	0.793	80	0.322	0.804	0.0042	0.0106
120	0.476	0.793	120	0.475	0.791	120	0.470	0.783	120	0.474	0.789	0.0032	0.0054
160	0.622	0.778	160	0.621	0.776	160	0.615	0.768	160	0.619	0.774	0.0041	0.0051
200	0.762	0.762	200	0.760	0.760	200	0.753	0.753	200	0.758	0.758	0.0048	0.0048
240	0.896	0.747	240	0.894	0.745	240	0.886	0.738	240	0.892	0.743	0.0055	0.0046
280	1.026	0.733	280	1.024	0.732	280	1.015	0.725	280	1.021	0.730	0.0060	0.0043
320	1.149	0.718	320	1.148	0.717	320	1.137	0.711	320	1.144	0.715	0.0064	0.0040
360	1.267	0.704	360	1.267	0.704	360	1.256	0.698	360	1.263	0.702	0.0068	0.0038
400	1.382	0.691	400	1.382	0.691	400	1.370	0.685	400	1.378	0.689	0.0070	0.0035
440	1.490	0.677	440	1.491	0.678	440	1.478	0.672	440	1.487	0.676	0.0071	0.0032
480	1.594	0.664	480	1.596	0.665	480	1.583	0.659	480	1.591	0.663	0.0072	0.0030
520	1.694	0.652	520	1.696	0.652	520	1.683	0.647	520	1.691	0.650	0.0072	0.0028
560	1.789	0.639	560	1.793	0.640	560	1.779	0.635	560	1.787	0.638	0.0071	0.0025
600	1.878	0.626	600	1.882	0.627	600	1.868	0.623	600	1.876	0.625	0.0070	0.0023
640	1.961	0.613	640	1.967	0.615	640	1.953	0.610	640	1.960	0.613	0.0069	0.0021
680	2.041	0.600	680	2.048	0.602	680	2.034	0.598	680	2.041	0.600	0.0067	0.0020
720	2.117	0.588	720	2.125	0.590	720	2.112	0.587	720	2.118	0.588	0.0067	0.0019
760	2.186	0.575	760	2.196	0.578	760	2.183	0.574	760	2.188	0.576	0.0067	0.0018
800	2.252	0.563	800	2.264	0.566	800	2.251	0.563	800	2.256	0.564	0.0069	0.0017
840	2.312	0.551	840	2.326	0.554	840	2.314	0.551	840	2.317	0.552	0.0073	0.0017
880	2.367	0.538	880	2.382	0.541	880	2.371	0.539	880	2.373	0.539	0.0080	0.0018

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	หงส์ ลีลาศุภกร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	11 เมษายน 2525
สถานที่เกิด	จ.ยะลา
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมกระบวนการอาหาร) ม. เชียงใหม่
ผลงานดีเด่นหรือรางวัลทางวิชาการ	ผลต่อสมรรถนะในการขยายขนาดเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมม เบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (งานประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่ง ประเทศไทยครั้งที่ 17)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	Asian Development Bank (ADB) ปี 2547-2549