

สมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์



นางสาวอารีรัตน์ ศรีกล้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2041-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# PERFORMANCE OF PEM FUEL CELL STACK

Miss Areerat Sriklam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-2041-2

Copyright of Chulalongkorn University

**490124**

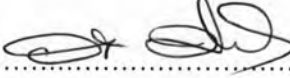
หัวข้อวิทยานิพนธ์                      สมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม  
โดย    นางสาวอารีรัตน์ ศรีกล้า  
สาขาวิชา                                    เคมีเทคนิค  
อาจารย์ที่ปรึกษา                          รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)           รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์

---

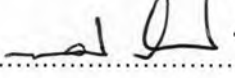
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

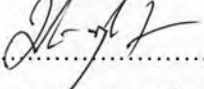
  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

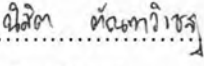
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์)

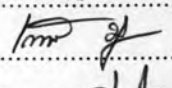
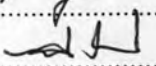
  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ นุ่นสม)

  
..... กรรมการ  
(ดร. นิลิต ตันทวีเชษฐ)

อารีรัตน์ ศรีกล้า : สมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. (PERFORMANCE OF PEM FUEL CELL STACK) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เกียรติ พงษ์ชาติ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 122 หน้า. ISBN 974-14 -2041-2

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม 7 เซลล์ขนาด 50 วัตต์ โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ความดันของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือความดันของแก๊สออกซิเจน สหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สไฮโดรเจนและความดันแก๊สออกซิเจน สหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน จากการศึกษาค้นคว้าของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ความดันในระบบ โมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบเซลล์ พบว่าชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตค่ากระแสไฟฟ้าได้ 14.2 แอมแปร์และได้กำลังไฟฟ้า 71 วัตต์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์ โดยใช้ภาวะอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลแก๊สออกซิเจน 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig โมเมนต์การหมุนที่เหมาะสมในการใช้อัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 70 ปอนด์แรง. นิ้ว

ภาควิชา...เคมีเทคนิค...  
สาขาวิชา...เคมีเทคนิค...  
ปีการศึกษา...2549...

ลายมือชื่อนิสิต... อารีรัตน์ ศรีกล้า .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...  .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม...  .....

# # 4672508023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PEMFC / STACK CELL / MEAS / DESIGN OF EXPERIMENTS

AREERAT SRIKLAM : PERFORMANCE OF PEM FUEL CELL STACK. THESIS

ADVISOR : ASSOC. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D., THESIS COADVISOR

: ASSOC. PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 122 pp. ISBN 974-17-2041-2.

This research was carried out to study the parameters effect on the performance of a commercial proton exchange membrane (PEM) fuel cell stack with seven cells, 50 watts by 2<sup>k</sup> factorial of experimental design methodology. The factors were hydrogen and oxygen pressures and flow rates. The experiments showed that oxygen pressure, interaction of hydrogen pressure and oxygen pressure, interaction of oxygen pressure, hydrogen flow rate and oxygen flow rate were main effects on performance of PEM fuel cell stack. From the studied parameters : hydrogen flow rate, oxygen flow rate, pressure and stack clamping force, the results showed that the optimum condition was found at hydrogen flow rate of 810 sccm, oxygen flow rate of 540 sccm, stack cell pressure of 50 psig. At 5.0 volt, stack cell can produce the current about 14.2 A, power 71 W. The stack cell, fabricated with the force of 70 lb<sub>f</sub>-in, gave the best performance.

Department :...Chemical Technology...

Student's Signature..... *อารีรัตน์ ศรีกล้า* .....

Field of Study :...Chemical Technology...

Advisor's Signature..... *B. Pruksathorn* .....

Academic Year :...2006...

Co-advisor's Signature..... *[Signature]* .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤษชาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมและคณาจารย์ทุกท่านในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่น้อง ๆ พี่ ๆ และ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ งานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา - มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม.....	4
2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม.....	4
2.2.1 อิเล็กโทรไลต์.....	5
2.2.2 ขั้วไฟฟ้า.....	7
2.2.3 ชั้นแก๊สแพร่.....	8
2.2.4 แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว.....	9
2.3 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	9
2.3.1 ขนาดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	9
2.3.2 ลักษณะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	13
2.3.3 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังแต่ละเซลล์.....	15

บทที่	หน้า
2.3.4 การกระจายของแก๊สเชื้อเพลิงภายในแต่ละเซลล์.....	20
2.3.5 การจัดการกับความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	23
2.3.6 ดุลความร้อนในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	24
2.3.7 การอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	30
2.4 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม.....	32
2.4.1 การผันกลับไม่ได้.....	32
2.4.2 การรวมค่าความต่างศักย์เกินที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง.....	37
2.4.3 ชั้นชั้นอนุประจุ.....	38
2.5 ความต้านทานเชิงซ้อน.....	39
2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 <sup>k</sup> .....	42
2.6.1 แบบจำลองการถดถอย.....	43
2.6.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	43
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	47
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	47
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิเคราะห์.....	51
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
3.4 ตัวแปรที่ศึกษา.....	51
3.5 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	52
3.5.1 การประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	52
3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	53
3.5.3 ขั้นตอนภายหลังจากการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง...	54
3.5.4 การทดสอบหาความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy.....	54
3.5.5 การทดสอบวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในแต่ละเซลล์.....	55
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	56
4.1 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design).....	56
4.1.1 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	61



บทที่

หน้า

4.1.2	ผลของความดันแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	62
4.1.3	ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สไฮโดรเจนและความดันแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	64
4.1.4	ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	65
4.1.5	ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	66
4.1.6	ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	67
4.2	การหาภาวะที่เหมาะสมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงด้วยวิธีการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ (Univariate).....	69
4.2.1	ผลของอัตราส่วนการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	69
4.2.2	ผลของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	72
4.2.3	ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	74
4.2.4	ผลของความดันที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า.....	76
4.3	การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	78
4.4	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพชั้นเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรน.....	80
4.5	ผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	82
4.6	ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	84
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1	การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	92
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	93
	รายการอ้างอิง .....	94
	ภาคผนวก .....	96
	ภาคผนวก ก.....	97
	ภาคผนวก ข.....	99

	ญ
	หน้า
ภาคผนวก ค.....	106
ภาคผนวก ง.....	115
ภาคผนวก จ.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	122

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง.....	25
4.1	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 5.0 โวลต์ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ภาวะต่าง ๆ .....	57
4.2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA).....	58
ก.1	ข้อมูลทางเทคนิคของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 วัตต์.....	97
ข.1	ผลการคำนวณขนาดของการก้าวอย่าง.....	105
ค.1	ตารางการออกแบบการทดลองแบบ $2^4$ แฟกทอเรียล.....	106
ค.2	ผลการออกแบบการทดลองแบบ $2^4$ แฟกทอเรียล (ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย).....	107
ค.3	ผลการออกแบบการทดลองแบบ $2^4$ แฟกทอเรียล (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย).....	108
ค.4	ผลการออกแบบการทดลองแบบ $2^4$ แฟกทอเรียล (ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย).....	109
ค.5	ผลการออกแบบการทดลองแบบ $2^4$ แฟกทอเรียล (ค่าอุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเฉลี่ย).....	110
ค.6	ผลของอัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจน โดยวิธี Univariate.....	111
ค.7	ผลของอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจน โดยวิธี Univariate.....	112
ค.8	ผลของความดันในระบบ โดยวิธี Univariate.....	113
ค.9	ผลของโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	114

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เอม..... 5
2.2	โครงสร้างของ PFSA polymer (Nafion™)..... 6
2.3	ผลของปริมาณแพลทินัมต่อกราฟโพลาริเซชัน (H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> fuel cell)..... 7
2.4	ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ณ ภาวะการใช้ปริมาณแพลทินัมที่ แตกต่างกัน..... 8
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงกับศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการ..... 12
2.6	โครงสร้างโดยรวมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง..... 13
2.7	โครงสร้างของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีระบบการให้ความชื้นอยู่ภายใน..... 14
2.8	ลักษณะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีระบบการจัดการกับน้ำภายในเซลล์โดยใช้ Porous plate..... 15
2.9	ลักษณะการไหลของแก๊สภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง..... 16
2.10	การออกแบบของความดันและการไหลรวมไปถึงตัวแปรที่มีผลต่อการไหลสำหรับ ช่องทางการไหลแบบตัวยูและสำหรับช่องทางการไหลแบบตัวแซดภายในชั้น เซลล์เชื้อเพลิง..... 17
2.11	ทิศทางการไหลที่เป็นไปได้ในแผ่นช่องทางการไหล..... 21
2.12	รูปแบบต่าง ๆ ของการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิง..... 21
2.13	ลักษณะของช่องทางการไหลในรูปแบบต่าง ๆ ..... 22
2.14	รูปแบบและลักษณะการหล่อเย็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิง..... 23
2.15	ลักษณะการโค้งตัวของแผ่นประกบกรณีใช้แรงในการอัดประกอบเซลล์มาก เกินไป..... 31
2.16	ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แรงในการอัดประกอบต่างกัน.. 31
2.17	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวส์เอม..... 32
2.18	กราฟกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเคมีในเชิงทฤษฎี..... 39
2.19	Nyquist plot และ Bode Plot..... 41
3.1	ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เอมขนาด 50 วัตต์ของบริษัท Electrochem.Inc..... 47
3.2	หน่วยประกอบหัวไฟฟ้าเมมเบรนขนาด 50 ตารางเซนติเมตร..... 48
3.3	ลักษณะช่องทางการไหลในแผ่นนำไฟฟ้าสองหัวที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เอม..... 48

รูปที่	หน้า
3.4	แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม..... 49
3.5	แผ่นประกบของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม..... 49
3.6	โครงสร้างของหน่วยทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง..... 50
3.7	หน่วยทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง..... 51
3.8	ลักษณะของการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเรียง 30 องศาในหน่วยทดสอบ..... 52
4.1	ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้า (Half normal probability plot)..... 59
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability plot กับส่วนตกค้างของค่ากระแสไฟฟ้า..... 60
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย..... 60
4.4	ผลกระทบของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า..... 61
4.5	ผลของความคลาดเคลื่อนกับความดันแก๊สไฮโดรเจน..... 62
4.6	ผลกระทบของความดันแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า..... 63
4.7	ผลของความคลาดเคลื่อนกับความดันแก๊สออกซิเจน..... 63
4.8	ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สไฮโดรเจนและความดันแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า..... 64
4.9	ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า..... 65
4.10	ผลกระทบของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า..... 66
4.11	ผลกระทบของสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า..... 68
4.12	โพลาริเซชันของผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 ความดันในระบบ 50 psig..... 70
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 ความดันในระบบ 50 psig..... 70

รูปที่	หน้า
4.14 โพลาริเซชันของผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 ความดันในระบบ 50 psig.....	71
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 ความดันในระบบ 50 psig .....	71
4.16 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่าง ๆ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนคงที่ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig .....	73
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่าง ๆ และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig.....	73
4.18 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนคงที่ 810 sccm ความดันในระบบ 50 psig .....	75
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm ความดันในระบบ 50 psig.....	75
4.20 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันต่าง ๆ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนคงที่ 810 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 540 sccm .....	77
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 540 sccm .....	77
4.22 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันต่าง ๆ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 407 sccm และ 207 sccm ตามลำดับ.....	79

รูปที่	หน้า
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันต่าง ๆ โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 407 sccm และ 270 sccm ตามลำดับ .....	79
4.24 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนที่ความดันต่าง ๆ ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 405 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 270 sccm.....	80
4.25 ผลการเปรียบเทียบโพลาริเซชันที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ผ่านการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแผ่นที่ 7 กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวใหม่ ณ ภาวะอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 500 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 500 sccm ความดันในระบบ 20 psig (Old stack: ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวเก่าก่อนชำรุด, New stack: ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวใหม่, Repaired: ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวเก่าหลังผ่านการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแผ่นที่ 7).....	81
4.26 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ผ่านการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแผ่นที่ 7 กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวใหม่ ณ ภาวะอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 500 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 500 sccm ความดันในระบบ 20 psig.....	82
4.27 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่แรงโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig.....	83
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่แรงโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig.....	84
4.29 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig โมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 70 ปอนด์แรง.นี้ว.....	86

รูปที่	หน้า	
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig โมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	86
4.31	ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมในแต่ละหน่วยประกอบหัวไฟฟ้าเมมเบรนของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (ไม่รวมแผ่นช่องทางไหล) ที่แรงโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 70 ปอนด์แรง.นิ้ว โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig .....	87
4.32	ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมในแต่ละเซลล์เดี่ยวของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (รวมแผ่นช่องทางไหล) ที่แรงโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 70 ปอนด์แรง.นิ้ว โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig .....	87
4.33	ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่หนึ่งด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	88
4.34	ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สองด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	88
4.35	ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สามด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	89



รูปที่	หน้า
4.36 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สี่ด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	89
4.37 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่ห้าด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	90
4.38 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่หกด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	90
4.39 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่เจ็ดด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	91
ง.1 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่หนึ่ง ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	115
ง.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สอง ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	115
ง.3 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สาม ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	116

รูปที่	หน้า
ง.4 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สี่ ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	116
ง.5 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่ห้า ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	117
ง.6 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่หก ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	117
ง.7 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่เจ็ด ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว.....	118