ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249355

การศึกษาพลวัตของการกระตุ้นเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดทีโดยตรง

นพวิชา จันทร์ธนัมพ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

b00253828

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249355

การศึกษาสภาวะการกระตุ้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง

นายภิชา จันทร์อนันต์ วศ.บ. (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.ชุติมา จารุศิริพจน์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร. อภิชัย เทอดเทียนวงษ์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รศ.ดร. สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ปานจันทร์ ศรีจรูญ)

..... กรรมการ
(ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสภาวะการกระตุ้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายภิชา จันทร์อนันต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อภิชัย เทอดเทียนวงษ์
	รศ.ดร.สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2553

บทคัดย่อ

249355

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการกระตุ้นเซลล์ (Cell activation) ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง การศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ช่วง กล่าวคือ การเปรียบเทียบการใช้ก๊าซไฮโดรเจนและสารละลายเอธานอลในการกระตุ้นขั้วแอโนด จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความต่างศักย์ขณะกระตุ้นเซลล์และความดันก๊าซไฮโดรเจนที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์ ช่วงที่สามคือการศึกษาการสลับเอาก๊าซออกซิเจนป้อนเข้าขั้วแอโนดและใช้ก๊าซไฮโดรเจนป้อนเข้าขั้วแคโทด ส่วนช่วงสุดท้ายคือการกระตุ้นเซลล์แบบสามขั้นตอนโดยเริ่มต้นจากการใช้สารละลายเอธานอลที่ค่าความต่างศักย์ 0.3 V ตามด้วยการใช้สารละลายเอธานอลที่ความต่างศักย์ต่ำ (0.1 V) และขั้นที่สามคือการกระตุ้นโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ค่าความต่างศักย์ 0.6 V จากผลการศึกษาพบว่า การกระตุ้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้ไฮโดรเจนให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารละลายเอธานอล โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นเซลล์โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนคือที่สภาวะความดันก๊าซที่สูงและค่าความต่างศักย์ที่ต่ำ และพบว่าการสลับก๊าซออกซิเจนป้อนเข้าขั้วแอโนดและใช้ก๊าซไฮโดรเจนป้อนเข้าที่ขั้วแคโทดไม่ได้มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์ภายหลังการกระตุ้นซึ่งพบว่าการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าที่ขั้วแอโนดไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของเซลล์และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์ทั้ง 2 ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการกระตุ้นเซลล์แบบสามขั้นตอนให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์สูงที่สุดในบรรดาวิธีการกระตุ้นเซลล์ทั้งหมด โดยพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 20 mW/cm^2 (ประมาณ 1.4 เท่าของเซลล์ที่กระตุ้นด้วยก๊าซไฮโดรเจนอย่างเดียว)

249355

คำสำคัญ : เซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง / การกระตุ้นเซลล์ / สารละลายเอธานอล / สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

Thesis Title	Influence of Activation Conditions on the Performance of a Direct Ethanol Fuel cell
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Picha Jananan
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Apichai Therdthianwong
	Assoc. Prof. Dr. Supaporn Therdthianwong
Program	Master of Engineering
Field of Study	Chemical Engineering
Department	Chemical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2553

Abstract.

249355

The effect of the cell activation method on direct ethanol fuel cell (DEFC) performance was investigated. The work was divided into 4 steps: the comparison between the cell activation using hydrogen and ethanol, the influence of voltage and gas pressure in DEFC activation using hydrogen gas, the interchange between the anode and cathode gas, and the use of multi-step activation method (activation in the sequence staring from ethanol at 0.3 V, ethanol at 0.1 V and hydrogen gas at 0.6 V). From the experimental results, it was found that the performance of the cell activated by hydrogen gas was higher than that activated by ethanol solution. For DEFC activation using hydrogen gas, a better cell performance was obtained under the condition of high gas pressure and low activation voltage. Furthermore, there was no influence of anode / cathode gas alternation on the cell performance. Feeding oxygen gas into the anode did not improve the cell performance and equivalent power densities were observed with these two cells. In addition, the multistep activation method provided the highest cell performance with the average power density of 20 mW/cm^2 (About 1.4 times the power density obtained from the cell activated by hydrogen gas).

Keywords : Direct Ethanol Fuel Cell / Cell Activation / Ethanol Solution / Performance of Direct Ethanol Fuel Cell

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รศ.ดร.อภิชัย เทอดเทียนวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนชี้จุดบกพร่องในการดำเนินงานวิจัยด้วยดีมาโดยตลอด รวมทั้งคำอบรมสั่งสอนที่มีประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตเป็นอย่างยิ่ง และกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ ผศ.ดร.ปานจันทร์ ศรีจรูญ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ อาจารย์สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ผศ.ดร.ชุติมา จารุศิริพจน์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากรให้เกียรติเป็นคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง และสุดท้ายขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ รวมถึงผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัยนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และครอบครัวสำหรับความห่วงใย กำลังใจ และการสนับสนุนตลอดมา

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ง
กิตติกรรมประกาศ		จ
สารบัญ		ฉ
รายการตาราง		ฌ
รายการรูปประกอบ		ญ
1. บทนำ		**1**
1.1	ที่มาและความสำคัญ	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		**5**
2.1	งานวิจัยที่ผ่านมา	5
2.2	เซลล์เชื้อเพลิง	9
2.2.1	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	9
2.2.2	ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	10
2.3	เซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง (direct ethanol fuel cell)	14
2.3.1	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง	14
2.3.2	ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง	15
2.3.3	ส่วนประกอบ MEA ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง	18
2.4	การสูญเสียความต่างศักย์ (Polarization losses)	20
2.4.1	สาเหตุของการสูญเสียค่าความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิง	21
3. การดำเนินงานวิจัย		**23**
3.1	อุปกรณ์และสารเคมีหลักที่ใช้ในการทดลอง	23
3.1.1	อุปกรณ์	23
3.1.2	วัตถุดิบ สารเคมีและก๊าซ	24

3.2 ขั้นตอนวิธีการทดลอง 24

3.2.1 การเตรียมเซลล์เชื้อเพลิง 25

3.2.2 การกระตุ้นเซลล์ 26

3.2.3 การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว 27

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ **29**

4.1 การเปรียบเทียบการใช้ก๊าซไฮโดรเจนและสารละลายเอธานอลในการกระตุ้นขั้วแอโนด 29

4.1.1 การกระตุ้นเซลล์ด้วยก๊าซไฮโดรเจน 29

4.1.2 การกระตุ้นเซลล์ด้วยสารละลายเอธานอล 30

4.2 อิทธิพลของค่าความต่างศักย์ขณะกระตุ้นเซลล์และความดันก๊าซไฮโดรเจนที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลลเชื้อเพลิง 34

4.2.1 การเปรียบเทียบอิทธิพลของความต่างศักย์ขณะกระตุ้นเซลล์และความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์ 40

4.2.1.1 ความต่างศักย์ขณะกระตุ้นเซลล์ 41

4.2.1.2 ความดันก๊าซไฮโดรเจน 44

4.3 การสลับกันของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนเพื่อกระตุ้นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดตามลำดับ 46

4.3.1 ก๊าซที่ใช้ในการกระตุ้นเซลล์ 48

4.4 การกระตุ้นเซลล์แบบหลายขั้นตอน 51

4.5 สาเหตุที่ทำให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรงลดลง 56

4.5.1 สารละลายเอธานอลแพร่ผ่านเมมเบรน (Crossover) จากด้านแอโนดไปยังด้านแคโทด 56

4.5.2 Sn บนตัวเร่งปฏิกิริยา Pt_3Sn_1/C ไม่ทำงานหรือทำงานได้น้อยลง 59

4.5.3 การเกิดพิษ (Poison) บนตัวเร่งปฏิกิริยา Pt_3Sn_1/C 61

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ **64**

5.1 สรุปผลการทดลอง 64

5.2 ข้อเสนอแนะ 64

เอกสารอ้างอิง **65**

ภาคผนวก **68**

ก การคำนวณ 68

ข ข้อมูลผลการทดลอง 71

ประวัติผู้วิจัย **103**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นของปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเอธานอล ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน 17

3.1 รายชื่อสารเคมีและบริษัทที่ผลิต 24

3.2 การทดลองเปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นเซลล์ด้วยก๊าซไฮโดรเจน และด้วยสารละลายเอธานอล 26

3.3 การทดลองเพื่อดูอิทธิพลของความดัน ความต่างศักย์และสารที่ใช้กระตุ้นเซลล์ 27

4.1 ช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสที่ความต่างศักย์ต่างๆ 40

ข.1.1 ผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ ด้วยก๊าซไฮโดรเจน “เซลล์ 1” 72

ข.1.2 ผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ ด้วยสารละลายเอธานอล “เซลล์ 2” 73

ข.2.1 ผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ตามการทดลอง “เซลล์ 3” 74

ข.2.2 ผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ตามการทดลอง “เซลล์ 4” 79

ข.2.3 ผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ตามการทดลอง “เซลล์ 5” 84

ข.2.4 ผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ตามการทดลอง “เซลล์ 6” 89

ข.3.1 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาเมื่อความต่างศักย์คงที่ ที่ 0.3 V และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์แบบหลายขั้นตอน 94

ข.3.2 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาเมื่อความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 V และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ตามการทดลอง “เซลล์ 3” 95

ข.3.3 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาเมื่อความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 V และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ตามการทดลอง “เซลล์ 4” 96

ข.3.4 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาเมื่อความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 V และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ตามการทดลอง “เซลล์ 5” 97

ข.3.5 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาเมื่อความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 V และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ตามการทดลอง “เซลล์ 6” 98

ข.4.1 ผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงทดสอบสมมติฐาน 99

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	9
2.2	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง	14
2.3	ผลของการเติมสารเติมแต่งที่มีต่อปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเอธานอลของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอธานอลโดยตรง (DEFC) ที่สภาวะการทำงาน: อุณหภูมิเซลล์ 90°C แอโนด: PtM/C, 1.3 mg Pt cm^{-2}, ความเข้มข้นของสารละลายเอธานอล 1.0 โมลต่อลิตร, อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที แคโทด: Pt/C (20% Johnson Mattey Corp.), 1.0 mg cm^{-2}, P_{o2} = 2.0 atm อิเล็กโทรไลต์: Nafion-115 membrane	16
2.4	กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเอธานอล เมื่อใช้ PtSn เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	17
2.5	โครงสร้างของ Nafion	18
2.6	แสดงการแพร่ผ่าน Nafion membrane ของโปรตอน	19
2.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ และความหนาแน่นกระแส	20
4.1	กราฟโพลาไรเซชั่นและกราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ด้วยก๊าซไฮโดรเจน (เซลล์ 1)	30
4.2	กราฟโพลาไรเซชั่นและกราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ด้วยสารละลายเอธานอล (เซลล์ 2)	31
4.3	กราฟโพลาไรเซชั่นและกราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ด้วยก๊าซไฮโดรเจน (เซลล์ 1) เปรียบเทียบกับของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ด้วยสารละลายเอธานอล (เซลล์ 2)	32
4.4	กราฟโพลาไรเซชั่นและกราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์ 2 ระหว่างที่ได้รับการกระตุ้นเซลล์ด้วยสารละลายเอธานอล	33
4.5	กราฟโพลาไรเซชั่นของเซลล์เชื้อเพลิงตามการทดลอง “เซลล์ 3” แอโนด (Pt_3Sn_1/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดัน 1 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดัน 1 บรรยากาศ, ความต่างศักย์ 0.3 V	35
4.6	กราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงตามการทดลอง “เซลล์ 3” แอโนด (Pt_3Sn_1/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดัน 1 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดัน 1 บรรยากาศ, ความต่างศักย์ 0.3 V	36

4.7 กราฟโพลาไรเซชั่นของเซลล์เชื้อเพลิงตามการทดลอง “เซลล์ 4” แอโนด (Pt_3Sn_1/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดัน 1 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดัน 1 บรรยากาศ, ความต่างศักย์ 0.6 V 37

4.8 กราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงตามการทดลอง “เซลล์ 4” แอโนด (Pt_3Sn_1/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดัน 1 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดัน 1 บรรยากาศ, ความต่างศักย์ 0.6 V 38

4.9 กราฟโพลาไรเซชั่นของเซลล์เชื้อเพลิงตามการทดลอง “เซลล์ 5” แอโนด (Pt_3Sn_1/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดันสัมบูรณ์ 2 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดันสัมบูรณ์ 2 บรรยากาศ, ดึงกระแสที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.6 V, อุณหภูมิของเซลล์ 80 °C 39

4.10 กราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงตามการทดลอง “เซลล์ 5” แอโนด (Pt_3Sn_1/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดันสัมบูรณ์ 2 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดันสัมบูรณ์ 2 บรรยากาศ, ดึงกระแสที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.6 V, อุณหภูมิของเซลล์ 80 °C 39

4.11 กราฟโพลาไรเซชั่นและกราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 3” และ “เซลล์ 4” (ค่าเฉลี่ย) 42

4.12 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสเทียบกับเวลา ที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 3” และ “เซลล์ 4” 43

4.13 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ OCV ของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 3” และ “เซลล์ 4” 43

4.14 กราฟโพลาไรเซชั่นและกราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 4” และ “เซลล์ 5” (ค่าเฉลี่ย) 44

4.15 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสเทียบกับเวลา ที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 4” และ “เซลล์ 5” 45

4.16 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ OCV ของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 4” และ “เซลล์ 5” 45

4.17 กราฟโพลาไรเซชั่นของเซลล์เชื้อเพลิงตามการทดลอง “เซลล์ 6” แอโนด (Pt_3Sn_1/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ, ดึงกระแสที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 V, อุณหภูมิของเซลล์ 80 °C 47

4.18 กราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงตามการทดลอง “เซลล์ 6” แอโนด (Pt_3Sn_1/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ, ดึงกระแสที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 V, อุณหภูมิของเซลล์ 80 °C 48

4.19 กราฟโพลาไรเซชั่นและกราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 3” และ “เซลล์ 6” (ค่าเฉลี่ย) 49
4.20 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสเทียบกับเวลา ที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 3” และ “เซลล์ 6” 50
4.21 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ OCV ของเซลล์เชื้อเพลิง “เซลล์ 3” และ “เซลล์ 6” 51
4.22 เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อสมรรถนะการทำงาน มีค่าสูงสุดภายหลังได้รับการกระตุ้นเซลล์ในแต่ละขั้นตอน 54
4.23 กราฟการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสเทียบกับเวลา ที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.3 และ 0.5 V ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการกระตุ้นแบบหลายขั้นตอน 55
4.24 กราฟโพลาไรเซชั่นของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวแบบเปิด OCV คั่น 57
4.25 กราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวแบบเปิด OCV คั่น 57
4.26 กราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวแบบไม่เปิด OCV คั่น 58
4.27 กราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวแบบไม่เปิด OCV คั่น 58
4.28 กราฟโพลาไรเซชั่นของเซลล์ทดสอบสมมติฐาน แอโนด (Pt/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ, ดึงกระแสที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.6 V, อุณหภูมิของเซลล์ 80 °C 59
4.29 กราฟกำลังไฟฟ้าของเซลล์ทดสอบสมมติฐาน แอโนด (Pt/C) ป้อนก๊าซไฮโดรเจน ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ, แคโทด (Pt/C) ป้อนก๊าซออกซิเจน ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ, ดึงกระแสที่ความต่างศักย์คงที่ที่ 0.6 V, อุณหภูมิของเซลล์ 80 °C 60
4.30 เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของเซลล์ 4 และเซลล์ทดสอบสมมติฐาน 61