

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	6
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	7
2.1 หลักการและทฤษฎีของเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง	7
2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	8
2.3 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด	10
2.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	11
2.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	40
3.1 ระบบทำความชื้นสำหรับชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	40
3.2 เครื่องมือวัด	43
3.3 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบทดสอบประสิทธิภาพ เซลล์เชื้อเพลิง	47
3.4 เซลล์เชื้อเพลิงและรูปแบบสนามการไหล	50
3.5 การจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์	60
4.1 ผลการทดสอบ	60
4.2 ผลการทดสอบเซลล์เดี่ยวและห่อเซลล์เชื้อเพลิง	68
4.3 การสะสมน้ำในห่อเซลล์เชื้อเพลิง	80
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	83
5.1 สรุปผลการวิจัย	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารอ้างอิง	85
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณ	88
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	101
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของก๊าซเชื้อเพลิง	108
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	177
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบการใช้ระบบ By Pass System	187
ภาคผนวก ฉ บทความตีพิมพ์	200
ประวัติผู้เขียน	211

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ความดันอิมพัลส์ของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ	36
4.1 ความขึ้นสัมพัทธ์ก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิของเครื่องทำความขึ้น และอัตราการไหลต่าง ๆ	62
4.2 ความขึ้นสัมพัทธ์ก๊าซไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิของเครื่องทำความขึ้น และอัตราการไหลต่าง ๆ	62
4.3 ความขึ้นสัมพัทธ์ก๊าซไนโตรเจน ณ อุณหภูมิของเครื่องทำความขึ้น และอัตราการไหลต่าง ๆ	63
4.4 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ของเซลล์ขนาด 1 ชั้น	69
4.5 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ของเซลล์ขนาด 5 ชั้น	72
ค1 ผลการทดสอบการหาค่าความขึ้นของก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความขึ้น 40 องศาเซลเซียส	109
ค2 ผลการทดสอบการหาค่าความขึ้นของก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความขึ้น 42 องศาเซลเซียส	113
ค3 ผลการทดสอบการหาค่าความขึ้นของก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความขึ้น 44 องศาเซลเซียส	117
ค4 ผลการทดสอบการหาค่าความขึ้นของก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความขึ้น 46 องศาเซลเซียส	121
ค5 ผลการทดสอบการหาค่าความขึ้นของก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความขึ้น 47 องศาเซลเซียส	125
ค6 ผลการทดสอบการหาค่าความขึ้นของก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความขึ้น 50 องศาเซลเซียส	129
ค7 ผลการทดสอบการหาค่าความขึ้นของก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความขึ้น 60 องศาเซลเซียส	133
ค8 ผลการทดสอบการหาค่าความขึ้นของก๊าซไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความขึ้น 40 องศาเซลเซียส	137

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ค9 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 42 องศาเซลเซียส	141
ค10 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 44 องศาเซลเซียส	145
ค11 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 46 องศาเซลเซียส	149
ค12 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 48 องศาเซลเซียส	153
ค13 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 50 องศาเซลเซียส	157
ค14 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 60 องศาเซลเซียส	161
ค15 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไนโตรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 40 องศาเซลเซียส	165
ค16 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไนโตรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 50 องศาเซลเซียส	169
ค17 ผลการทดสอบการหาค่าความชื้นของก๊าซไนโตรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 60 องศาเซลเซียส	173
ง1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น ณ อัตราการไหล 50 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความชื้นที่ 40-60 °C	178
ง2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น ณ อัตราการไหล 100 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความชื้นที่ 40-60 °C	179
ง3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น ณ อัตราการไหล 150 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความชื้นที่ 40-60 °C	180
ง4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น ณ อัตราการไหล 200 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความชื้นที่ 40-60 °C	181

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ง5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น ณ อัตราการไหล 250 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนที่ 40-60 °C	182
ง6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น ณ อัตราการไหล 300 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนที่ 40-60 °C	183
ง7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น ณ อัตราการไหล 350 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนที่ 40-60 °C	184
ง8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 5 ชั้น ณ อัตราการไหล 250 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนที่ 40-60 °C	185
ง9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง 5 ชั้น ณ อัตราการไหล 500 sccm และอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนที่ 40-60 °C	186
จ1 ผลของการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยตรงให้แก่เซลล์เชื้อเพลิง ขนาดเซลล์ 1 ชั้น	188
จ2 ผลของการจ่ายก๊าซออกซิเจนโดยตรงให้แก่เซลล์เชื้อเพลิงขนาดเซลล์ 5 ชั้น	192
จ3 ผลของการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงและผลอุณหภูมิ ภายในเซลล์ขนาด 1 ชั้น เวลา 5 ชั่วโมง	198
จ4 ผลของการจ่ายก๊าซออกซิเจนโดยตรงให้แก่เซลล์เชื้อเพลิงและผลอุณหภูมิ ภายในเซลล์ขนาด 1 ชั้น เวลา 5 ชั่วโมง	199

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 (ก) กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้า	8
(ข) เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ออกซิเจนและไฮโดรเจนเกิดการรวมตัวกันใหม่อีกครั้ง	8
2.2 ภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	9
2.3 แผนภาพการปล่อยพลังงานสำหรับปฏิกิริยาเคมีแบบคายความร้อน	10
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแส	11
2.5 ภาพตัดขวางของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน 1 เซลล์	15
2.6 รูปแบบโครงสร้างทั่วไปของเซลล์เดี่ยว	15
2.7 การเปรียบเทียบรูปแบบของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	18
2.8 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา	19
2.9 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ serpentine	22
2.10 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ parallel	23
2.11 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ parallel-serpentine	23
2.12 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ discontinuous	24
2.13 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ spiral	24
2.14 การต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบอนุกรมโดยใช้แผ่นสองขั้ว	27
2.15 การส่งถ่ายน้ำจากกลไกต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นใน PEMFC	32
2.16 แผนภาพอธิบายความดันไอน้ำอิ่มตัว	34
2.17 กราฟความชื้นสัมพัทธ์- อุณหภูมิ สำหรับอากาศทางออกของ PEMFC ที่ λ ต่างกัน	38
สองค่าสมมติให้อากาศทางออกเป็นอากาศแห้ง และความดันรวมเท่ากับบรรยากาศ	38
2.18 ก๊าซปฏิกิริยาไหลในทิศตรงข้ามกันเพื่อช่วยกระจายความชื้น	39
3.1 แผนผังระบบควบคุมความชื้น	40
3.2 ระบบทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง	41
3.3 ตัวถังให้ความชื้น	42
3.4 (a) หัววัดความชื้น	43
3.4 (b) กล่องใส่หัววัดความชื้น	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.5 (a) อุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซขาเข้าระบบ	44
3.5 (b) อุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซขาออกเซลล์เชื้อเพลิง	44
3.6 (a) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน	45
3.7 Electronic Load	46
3.8 ส่วนควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิ	46
3.9 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง	47
3.10 แผนภาพส่วนควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ	48
3.11 แผนภาพส่วนควบคุมอุณหภูมิ	48
3.12 แผนภาพส่วนควบคุม electronics load	49
3.13 ผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรมและอุปกรณ์วัด	49
3.14 รูปแบบสนามการไหลแบบ serpentine	50
3.15 ระบบการสอบเทียบหัววัดความชื้น	52
3.16 ภาพอย่างง่ายของระบบความคุมความชื้นของเซลล์เชื้อเพลิง	58
3.17 ภาพอย่างง่ายของระบบที่มีการปรับความชื้นทางด้านไฮโดรเจน	58
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสที่สภาวะต่างๆ	64
4.2 เปรียบเทียบเซลล์เดี่ยวทำงานด้วยอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต่างกัน	66
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเทียบกับความหนาแน่นกระแส ที่อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 40 °C	70
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเทียบกับความหนาแน่นกระแส ที่อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 50 °C	71
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเทียบกับความหนาแน่นกระแส ที่อุณหภูมิเครื่องทำความชื้น 60 °C	71
4.6 ผลการทดสอบในสภาวะที่เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ชั้นให้ประสิทธิภาพสูงสุด	73
4.7 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์กับเวลากรณีดึงกระแสคงที่ที่ 4.5 Amp	75
4.8 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลากรณีดึงกระแสคงที่ที่ 4.5 Amp	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์กับเวลา กรณี By pass ก๊าซไฮโดรเจน จาก Humidifier สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น	76
4.10 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์กับเวลา กรณี By pass ก๊าซออกซิเจน จากเครื่องทำความชื้น สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น	76
4.11 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์กับเวลา กรณี By pass ก๊าซออกซิเจน จากเครื่องทำความชื้น โดยเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 2 เท่า สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชั้น	77
4.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลากรณี By pass ก๊าซออกซิเจน เป็น 2 เท่า ในเวลา 5 ชั่วโมง	78
4.13 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์กับเวลา กรณี By pass ก๊าซออกซิเจนจาก เครื่องทำความชื้น โดยเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 2 เท่า สำหรับห่อเซลล์เชื้อเพลิง 5 ชั้น	79
4.14 อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในห่อเซลล์เชื้อเพลิง	81
4.15 อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในห่อเซลล์เชื้อเพลิงด้านแคโทดในกรณีที่มี การให้ความชื้นและไม่ให้ความชื้นแก่ก๊าซออกซิเจน	81
ก1 ภาพอย่างง่ายของระบบที่มีการปรับความชื้นทางด้านไฮโดรเจน	93

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
U	Internal energy	kJ/kg
H	Enthalpy	kJ/kg
S	Entropy	kJ/kg.K
G	Gibbs free energy	
N	จำนวนโมลของอิเล็กตรอน	Mole
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์	
R_e	ค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์	
v	ความเร็วของการไหล	m/s
ρ	ความหนาแน่นของของไหล	kg/m^3
μ	ความหนืด	kg/m.s
δ	ค่าคงที่ (proportional constant) ที่เรียกว่า diffusivity	m^2/s
Γ	ความเข้มข้นของคุณสมบัติ	$\text{n, m}^3/\text{m}^2$
Z	ระยะทางในทิศทางการไหล	m
τ_{zx}	ฟลักซ์ของโมเมนตัมทิศทาง x ในทิศทาง z $(\text{kg m/s})/ \text{s.m}^2$	
ν	momentum diffusivity	m/s^2
J_{AZ}	ฟลักซ์ขององค์ประกอบ A ในทิศทาง z	kg molA/s.m^2
D_{AB}	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลขององค์ประกอบ A ในองค์ประกอบ B	m^2/s
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	$\text{W/m}^2.\text{K}$
ε	ความพรุนของวัสดุ	
κ	ความสามารถในการซึมผ่านชั้นพรุน	
ρ_0	ความหนาแน่นของของไหลที่ความดัน 1 หน่วย	kg/m^3
i	ก๊าซออกซิเจนที่ขั้วคาโทด และก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด	
j	ไอน้ำที่เกิดขึ้น	
D_{ii}	ประสิทธิภาพของการแพร่ผ่าน	

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
D_{ij}	Stefan-Maxwell ternary diffusion coefficients	
n_d	electro-osmotic drag coefficient	
D_w	สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในเมมเบรน	
T	อุณหภูมิ	K
s	เอนโทรปีจากปฏิกิริยาเคมี	kJ/kg.K
n_e	จำนวนอิเล็กตรอนในการเคลื่อนที่	n
η_{act}	activation over-potential	Volt
E_{cell}	input cell potential	Volt
M_h	มวลโมเลกุลของไฮโดรเจน = 2.02×10^{-3}	kg.mole ⁻¹
M_o	มวลโมเลกุลของออกซิเจน = 32×10^{-3}	kg.mole ⁻¹
M_w	มวลโมเลกุลของน้ำ = 18×10^{-3}	kg.mole ⁻¹
m_a	มวลของอากาศแห้ง	kg
m_h	มวลของไฮโดรเจน	kg
m_o	มวลของออกซิเจน	kg
m_h	อัตราการไหลเชิงมวลของไฮโดรเจน	kg.s ⁻¹
m_o	อัตราการไหลเชิงมวลของออกซิเจน	kg.s ⁻¹
m_w	อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำ	kg.s ⁻¹
N	อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซ	mole.s ⁻¹
N	เลขอาวอกาโดร , 6.022×10^{23}	
n	จำนวนเซลล์ในห่อเซลล์เชื้อเพลิง	
P	ความดัน	kPa
P_{atm}	ความดันบรรยากาศ	kPa
P_{sat}	ความดันไออิ่มตัว	kPa
P_{H_2}	ความดันย่อยของไฮโดรเจน	kPa
P_{O_2}	ความดันย่อยของออกซิเจน	kPa
P_{H_2O}	ความดันย่อยของไอน้ำ	kPa
P_o	ความดันมาตรฐาน = 1 บรรยากาศ = 100 kPa = 14.7 psi	

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
P_w	ความดันย่อยของไอน้ำ	kPa
Q_h	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของไฮโดรเจน	$m^3.s^{-1}$
Q_o	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของออกซิเจน	$m^3.s^{-1}$
R	ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314	$kPa.m^3/(mole.K)$
T	อุณหภูมิ	K
T_{stack}	อุณหภูมิของหอเซลล์เชื้อเพลิง	K
V	ความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิง	V
V_a	ความต่างศักย์เกินเนื่องจากพลังงานกระตุ้น	V
V_c	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 1 เซลล์ของหอเซลล์เชื้อเพลิง	V
V_m	ความต่างศักย์เกินเนื่องจากการส่งถ่ายมวล	V
V_r	ความต่างศักย์เกินโอห์มมิก	V
λ	อัตราเกินกว่าค่าทางทฤษฎีมวลสารสัมพันธ์	
λ_h	อัตราเกินกว่าค่าทางทฤษฎีมวลสารสัมพันธ์ของไฮโดรเจน(Hydrogen stoichiometry)	
λ_o	อัตราเกินกว่าค่าทางทฤษฎีมวลสารสัมพันธ์ของออกซิเจน(Oxygen stoichiometry)	