

# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

## บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	ภาควิชา

**เรื่อง** การออกแบบและพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

Design and Development of Power-Electronics Based Fuel Cell Emulators

## บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr. ) คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย วันที่ เดือน พ.ศ. วิทยานิพนธ์

เรื่อง

## การออกแบบและพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

Design and Development of Power-Electronics Based Fuel Cell Emulators

โดย

นายมนูญ บูลย์ประมุข

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) พ.ศ. 2552 มนูญ บูลย์ประมุข 2552: การออกแบบและพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อ เลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ประธานกรรมการที่ ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, Ph.D. 127 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงแบบใหม่เพื่อใช้ทำหน้าที่ แทนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจริงในขั้นตอนการออกแบบและทคสอบระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับ เซลล์เชื้อเพลิง ภาคกำลังของวงจรที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจร แปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง ด้วยการทำงานร่วมกันของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งสอง วงจรและเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอใน งานวิจัยนี้สามารถเลียนแบบผลตอบสนองทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้งานจริงใน ปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นไปที่การจำลองพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้งานจริงใน ปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นไปที่การจำลองพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอนและแบบออกไซด์ของแข็ง ซึ่งเหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ในยานพาหนะและใน โรงผลิตกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอ วิธีการวิเคราะห์ วิธีการจำลอง ทางคณิตศาสตร์ และวิธีการควบคุมวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ เพื่อเป็น การยืนยันสมรรถนะของภาคกำลังและประสาทธิภาพของภาคกวบคุมตามที่นำเสนอ ระบบ ด้นแบบขนาด 600 วัตต์ได้ถูกจัดสร้างขึ้น โดยมีแรงคันขาออกในช่วง 10 ถึง 70 โวลท์และกระแส พิกัดเท่ากับ 15 แอมป์ ผลการทดลองที่สำคัญชี้ให้เห็นว่า วงจรที่นำเสนอมีผลตอบสนองเชิงพลวัต และการทำงานที่สภาวะคงดัวที่ดีและสอดกล้องกับเทคนิกการออกแบบที่นำเสนอ Manoon Boonpramuk 2009: Design and Development of Power-Electronics Based Fuel Cell Emulators. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Siriroj Sirisukprasert, Ph.D. 127 pages.

This thesis proposes a novel power-electronics based fuel cell emulator used to replace a real fuel cell system during the development stage of a fuel-cell inverter system. The power stage of this new fuel cell emulator consists of a three-phase rectifier and a dc-to-dc buck converter. With the collaboration of these two power electronics circuits and the anticipated control technique, the proposed fuel cell emulator effectively provides correctly emulated responses for two well-known fuel cells such as proton exchange membrane fuel cell and solid oxide fuel cells, which are suitable for vehicle drives and electrical power generations, respectively. Analysis, modeling and control strategy for the proposed systems are presented. To verify its performance, a 600 W hardware prototype of the emulator has been implemented. The output voltage range of this prototype can be varied from 10 to 70 V, and its rated output current is 15 A. The experiment results shows that the performance of the proposed fuel cell emulation is exceptional and is consistent with the proposed concept.

/ /

#### กิตติกรรมประกาศ

ง้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์คร. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ อาจารย์ที่ ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้กวามช่วยเหลือทางค้านวิชาการและคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอคจนให้การสนับสนุนในทุกค้านจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ค้วยคี นอกจากนี้ ยังให้คำชี้แนะหลักการคำเนินชีวิตและแง่กิคที่เป็นประโยชน์ พร้อมทั้งยังเป็นแบบอย่างที่คีให้แก่ ง้าพเจ้าได้ยึคถือและปฏิบัติตาม ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ตลอคจน เพื่อนและรุ่นน้องทุกคนที่ได้ทำงานร่วมกันในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ประยุกต์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับความช่วยเหลือต่างๆ คำแนะนำและการสนับสนุนตลอค มาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระกุณ บิดา มารดา พี่ชาย และน้องสาวของข้าพเจ้าที่ได้ ให้โอกาสทางการศึกษาและการสนับสนุนในทุกด้านตลอดจนเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ให้แก่ข้าพเจ้า จนประสบความสำเร็จในการศึกษา บุญกุศลต่างๆที่ข้าพเจ้าได้กระทำไว้แล้วจงเป็นแรงบุญส่งถึงผู้มี พระกุณทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึง ขอให้ทุกท่านจงประสบแต่ความสุขความสำเร็จ ทั้งหน้าที่การงาน การเรียน และกรอบครัว เจริญด้วย อายุ วรรณะ สุขะ พละ ตลอดไป ข้าพเจ้าขอ ตอบแทนบุญกุณทุกท่านด้วยการเป็นคนดีของสังคมทำประโยชน์ให้แก่ส่วนรวมและประเทศชาติ ดำรงตัวให้อยู่ในหลักศีลธรรมอันดีงามตลอดไป

> มนูญ บูลย์ประมุข เมษายน 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
<u>ភិ</u> ទិការ	32
ผลและวิจารณ์	79
ผล	79
วิจารณ์	110
สรุปและข้อเสนอแนะ	123
สรุป	123
ข้อเสนอแนะ	124
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรบักกอนเวอร์เตอร์	44
2	กุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877	52

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากการทคลอง	4
2	โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบัน	5
3	การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง	5
4	เซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันเพื่อเพิ่มแรงคันไฟฟ้า	7
5	การเกิดปฏิกิริยาเคมีเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์	9
6	ปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอล โคยตรง	10
7	การเกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก	12
8	โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือการ์บอเนตหลอม	13
9	โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซค์ของแข็ง	15
10	โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน	16
11	ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงคันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	17
12	ลักษณะรูปกราฟแสดงความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาเคมีช้าและเร็ว	19
13	องค์ประกอบ โคยรวมทั้งหมคของเซลล์เชื้อเพลิง	22
14	การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิคต่างๆ	24
15	รถยนต์ที่ใช้ระบบพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง	25
16	ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PAFC ขนาค 200 กิโลวัตต์	26
17	ตัวอย่างระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	27
18	เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลกาไลน์ขนาด 1.5 kW ที่ใช้บนยานอวกาศอพอลโล	27
19	บล็อกไคอะแกรมวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง	33
20	ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง	34
21	วงจรเรียงกระแสสามเฟส	35
22	ต้นแบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่สร้างเสร็จ	37
23	การทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	38
24	ลักษณะของรูปคลื่นของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ใน โหมคกระแสต่อเนื่อง	39
25	รูปคลื่นการวิเคราะห์ค่าตัวเก็บประจุ	44

ภาพที่

26	วงจรต้นแบบบัคคอนเวอร์เตอร์	46
27	รูปถ่ายของ LEM LV25 – P	47
28	ลักษณะการต่อใช้งาน LEM LV25 – P	47
29	วงจรแปลงกระแสเป็นแรงคันและวงจรยกระคับแรงคัน	48
30	อุปกรณ์ตรวจจับกระแส	49
31	วงจรปรับระดับสัญญาณ	50
32	วงจรขับนำเกต TLP 250 และการต่อใช้งาน	51
33	LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 4 บรรทัด	51
34	การต่อใช้งานจอแสดงผล LCD	52
35	ใมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877	52
36	โปรแกรม MALAB เวอร์ชั่น 8.10	54
37	ตัวโปรแกรม ICD2 ของ Microchip	54
38	ตัวความต้านทานวัตต์สูง	55
39	ลักษณะการต่อวงจรสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้า	56
40	วงจรสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าทั้งหมดที่ควบคุมค้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	56
41	ความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงกับข้อมูล	57
42	ฐานข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิง	60
43	ลักษณะการกำหนดข้อมูลตามลักษณะก่าความสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิงที่นำ	
	เสนอในงานวิจัยนี้	60
44	กราฟแสดงสมการในแต่ละช่วงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์	62
45	กราฟแสดงสมการในแต่ละช่วงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	62
46	กราฟแสดงสมการในแต่ละช่วงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	63
47	กราฟแสดงสมการในแต่ละช่วงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์	63
48	ชุดควบกุมสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง	64
49	โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม	65

(4)

หน้า

ภาพที่		หน้า
50	วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	67
51	แบบจำลอง Matlab Simulink ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	67
52	แบบจำลอง Matlab Simulink ของสัญญาณ PWM	68
53	แบบจำลอง Matlab Simulink ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	68
54	ปรับค่าแรงคันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 20 เปอร์เซ็นต์	69
55	ปรับค่าแรงคันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์	69
56	ปรับค่าแรงคันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 80 เปอร์เซ็นต์	70
57	ตัวเงื่อนไขการตัดสินใจเพื่อเลือกก่าการกำนวณใน Simulink	70
58	แบบจำลอง Simulink ของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง	71
59	แรงคันและกระแสจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 25 เปอร์เซนต์	72
60	แรงดันและกระแสจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 50 เปอร์เซนต์	72
61	แรงดันและกระแสจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 75 เปอร์เซนต์	73
62	แรงดันและกระแสจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 100 เปอร์เซนต์	73
63	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูลเซลล์-	
	เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซนต์	74
64	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูลเซลล์-	
	เชื้อเพลิงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซนต์	75
65	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูลเซลล์-	
	เชื้อเพลิงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซนต์	75
66	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูลเซลล์-	
	เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซนต์	76

ภาพที่		หน้า
67	ค่าความคลาคเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์	76
68	ค่าความคลาคเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	77
69	ค่าความคลาคเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	77
70	ค่าความคลาคเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิง 100	
	เปอร์เซ็นต์	78
71	สัญญาณรูปคลื่นไซน์ของแรงคันระหว่างสาย	80
72	แรงคันไฟฟ้าเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสสามเฟส	80
73	แรงดันไฟฟ้าเมื่อผ่านตัวเก็บประจุ	80
74	แรงดันเอาต์พุตที่ก่าวัฏจักรการทำงาน 20 เปอร์เซ็นต์	81
75	แรงดันเอาต์พุตที่ก่าวัฏจักรการทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์	81
76	แรงดันเอาต์พุตที่ก่าวัฏจักรการทำงาน 80 เปอร์เซ็นต์	82
77	แรงดันกระเพื่อมที่แรงดันเอาต์พุต	82
78	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคันเอาต์พุตกับค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle)	83
79	วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซล์เชื้อเพลิงต้นแบบ	84
80	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทาน 20 โอห์มเป็น 10 โอห์ม ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์	85
81	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทาน 7.6 โอห์มเป็น 4.7 โอห์ม ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์	86
82	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทานเป็น 6.3 โอห์ม ที่อัตราการไหล	
	เชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์	86
83	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทานเป็น 5 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง	
	25 เปอร์เซ็นต์	87
84	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทานเป็น 3.5 โอห์ม ที่อัตราการไหล	
	เชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์	87

ภาพที่		หน้า
85	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามด้านทานเป็น 3 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง	
	25 เปอร์เซ็นต์	88
86	ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงคันขณะสับเปลี่ยนก่าความต้านทาน ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์	89
87	รูปแบบของค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่	90
88	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้า 20 โอห์มเป็น 10 โอห์ม ที่อัตราการไหล	
	เชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	91
89	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 6.2 โอห์ม ที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	92
90	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน 6.8 โอห์มเป็น 4 โอห์ม ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	92
91	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน 5.2 โอห์มเป็น 2.7 โอห์ม ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	93
92	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 2.5 โอห์ม ที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	93
93	ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงคันขณะสับเปลี่ยนก่ากวามต้านทาน ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	94
94	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน 20 โอห์มเป็น 10 โอห์ม ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	95
95	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน 6.9 โอห์มเป็น 3.5 โอห์ม ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	96
96	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 5.2 โอห์ม ที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	96
97	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 4.2 โอห์ม ที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	97

ภาพที่		หน้า
98	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทานเป็น 2.5 โอห์ม ที่อัตราการไหล	
	เชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	97
99	ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงคันขณะสับเปลี่ยนค่าความต้านทาน ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	98
100	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทาน 20 โอห์มเป็น 10 โอห์ม ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์	99
101	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน 6.5 โอห์มเป็น 3.5 โอห์ม ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์	100
102	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 4 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง	
	100 เปอร์เซ็นต์	100
103	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 3 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง	
	100 เปอร์เซ็นต์	101
104	แรงดันเอาต์พตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 2.5 โอห์ม ที่อัตราการไหล	
	เชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์	101
105	ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงคันขณะสับเปลี่ยนค่าความต้านทาน ที่อัตราการ	
	ใหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์	102
106	เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 วัตต์	103
107	ลักษณะฐานข้อมอเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 วัตต์	103
108	การประมาณค่าด้วยสมการเส้บตรงของฐาบข้อมุลเซลล์เชื้อเพลิง	105
100	ผลการจำลองการทำงาบเซลล์เชื้อเพลิง 500 วัตต์ด้ายโปรแกรบคอบพิวเตอร์	101
110	ผลเรรียบเพียงเระหว่างผลการจำลองบบเออบเพิ่วเตอร์กับเราบท้อบลเซลล์เชื้อเพลิง	105
110	พถเบาอาร์กการการเพียงการแองการเพื่องการของการจูการของสู่ถะบบถึงการการการการการการการการการการการการการก	105
111	งหาย 200 งทย ล่าลาาบลลาลเลลี่ลบขอบบบบลำลอบเหลอัเสื้อเพลิงขบาล 500 วัตต์ ด้วยโปรและบ	103
111	ออกพูวเฉอลุ ม เม า พนศ เมณากษา กลาก การการการการการการการการการการการการการก	100
	តតេអា អាវសតរ	106

## ภาพที่

(9)

112	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลด 26.7 โอห์มเป็น 14 โอห์ม	107
113	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลด 7 โอห์มเป็น 4 โอห์ม	107
114	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 3.2 โอห์ม	108
115	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 2.5 โอห์ม	108
116	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 1.3 โอห์ม	109
117	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 1.2 โอห์ม	109
118	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองวงจรต้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์	
	เชื้อเพลิงที่อัตราการ ใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์	110
119	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองวงจรต้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์	
	เชื้อเพลิงที่อัตราการ ใหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์	111
120	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองวงจรต้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์	
	เชื้อเพลิงที่อัตราการ ใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์	111
121	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองวงจรต้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์	
	เชื้อเพลิงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์	112
122	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองวงจรต้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์	
	เชื้อเพลิงขนาด 500 วัตต์	112
123	ค่าความคลาคเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหล	
	เชื้อเพลิง 25 เปอร์เซนต์	113
124	ค่าความคลาคเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหล	
	เชื้อเพลิง 50 เปอร์เซนต์	113
125	ค่าความคลาคเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหล	
	เชื้อเพลิง 75 เปอร์เซนต์	114

ภาพที่		หน้า
126	ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหล	
	เชื้อเพลิง 100 เปอร์เซนต์	114
127	ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับ	
	เซลล์เชื้อเพลิงขนาค 500 วัตต์	115
128	อุปกรณ์ตรวจจับแรงคันอินพุตเพิ่มเติมสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรม	
	เซลล์เชื้อเพลิง	116
129	แผนผังการชดเชยแรงดัน	116
130	แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลด 25 โอห์มเป็น 14.4 โอห์ม	117
131	แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลด 7.1 โอห์มเป็น 3.8 โอห์ม	118
132	แรงคันเอาต์พุศเมื่อเปลี่ยนโหลค 6.1 โอห์มเป็น 3.1 โอห์ม	118
133	แรงดันเอาต์พุศเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 2.5 โอห์ม	119
134	แรงดันเอาต์พุศเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 2.2 โอห์ม	119
135	แรงดันเอาต์พุศเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 1.9 โอห์ม	120
136	แรงดันเอาต์พุศเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 1.5 โอห์ม	120
137	ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการทคลองวงจรต้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิง	
	ขนาค 500 วัตต์ ที่ได้ทำการชดเชยแรงคันแล้ว	121
138	ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับ	
	เซลล์เชื้อเพลิงขนาค 500 วัตต์ ที่ได้ทำการชดเชยแรงคันแล้ว	121

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

А	=	ความชั้นของสมการเทเฟิล
AFC	=	Alkaline Fuel Cell
В	=	ค่าคงที่ของการถ่ายเทมวลสาร
С	=	ค่าตัวเก็บประจุ (ไมโครฟารัด)
CO <sub>2</sub>	=	คาร์บอนไดออกไซด์
СО	=	คาร์บอนมอนอกไซด์
CH <sub>3</sub> OH	=	เมทิลแอลกอฮอร์
CHP	=	Combined Heat and Power
CCM	=	Continuous Conduction Mode
DMFC	=	Direct Methanol Fuel Cell
e	=	อิเล็กตรอน
E	=	ค่าของแรงคันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงอุคมคติ
f	=	ความถี่การสวิตช์
F	=	ค่าคงที่ของฟาราเคย์ = 96,485 คูลอมบ์
FC	=	Fuel Cell
$\Delta \overline{g} f$	=	พลังงานที่ปล่อยออกมาจากการเกิคปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ
H <sub>2</sub>	=	ไฮโครเจน
$H^{^+}$	=	โปรตรอนของไฮโครเจน
H3PO4	=	กรดฟอสฟอริก
$\Delta i_{L}$	=	การเปลี่ยนแปลงของกระแส
i	=	ความหนาแน่นของกระแส ( mA/cm²)
i <sub>o</sub>	=	ความหนาแน่นของกระแสแลกเปลี่ยน (mA/cm²)
i <sub>n</sub>	=	ค่าความหนาแน่นกระแสภายใน ( mA/cm² )
i,	=	ค่าความหนาแน่นกระแสพิกัด ( mA/cm² )
i	=	กระแสตัวเหนี่ยวนำ
i <sub>c</sub>	=	กระแสตัวเกีบประจุ
$I_{dc}$	=	ค่ากระแสไฟฟ้าใช้งาน (แอมป์)
I <sub>L,max</sub>	=	กระแสตัวเหนี่ยวนำสูงสุด

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

=	กระแสตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด
=	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี่)
=	ค่ำตัวเหนี่ยวเล็กที่สูงสุด
=	Liquid Crystal Display
=	Moving Average
=	Molten Carbonate Fuel Cell
=	ออกซิเจน
=	Phosphoric Acid Fuel Cell
=	Pulse Width Modulation
=	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
=	ค่าเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้า
=	ค่าประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
=	ความต้านทานของพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา ( kΩ/cm² )
=	Root Mean Square
=	Solid Oxide Fuel Cell
=	Sum of Squares of Error
=	คาบเวลาการสวิตช์
=	คาบเวลาของกระแสไหลผ่านไคโอคแต่ละตัว
=	ค่าแรงดันกระเพื่อมเอาต์พุต
=	แรงคันสูญเสียจากการกระตุ้น
=	แรงคันสูญเสียจากความต้ำนทานภายใน
=	แรงคันสูญเสียจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง
=	ค่าแรงคันกระเพื่อม (โวลต์)
=	แรงดันเอาต์พุตของวงจรบักกอนเวอร์เตอร์
=	แหล่งจ่ายวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์
=	แรงดันตกกร่อมตัวเหนี่ยวนำ

# การออกแบบและพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อเลียนแบบพฤติกรรม เซลล์เชื้อเพลิง

#### Design and Development of Power-Electronics Based Fuel Cell Emulators

#### คำนำ

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่อาศัยปฏิกิริยาทาง เกมีระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดย เซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (Sir William Robert Grove) นักวิทยาศาสตร์และทนายกวามชาว อังกฤษ (Larminie and Dicks, 2003) ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงที่เด่นชัดคือไม่มีกระบวนการเผาใหม้ หรือสันดาปภายใน จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ อีกทั้งมีประสิทธิภาพ ที่สูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ 2 ถึง 3 เท่า ปัจจุบันเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเป็นแหล่งผลิต ไฟฟ้าที่จัดอยู่ในประเภทพลังงานหมุนเวียนเช่นเดียวกับ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงาน น้ำ เป็นต้น ซึ่งกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายโดยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าใช้ตามที่อยู่อาศัยหรือสำนักงาน และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับ ขับเคลื่อนยานยนต์ เป็นด้น

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยไม่ก่อมลภาวะดังที่ได้กล่าวมา โดยมี ส่วนประกอบหลักคือ ขั้วแคโทด ขั้วแอโนด และอิเล็กโทรไลต์ หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จะคล้ายกับแบตเตอรี่ซึ่งจะทำปฏิกิริยาบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ออกมาใช้งาน แต่จะแตกต่างตรงที่แบตเตอรี่นั้นสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้จำกัดและจะด้องมีการ ประจุไฟใหม่เมื่อต้องการนำมาใช้งานอีก แต่สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้า ออกมาใด้อย่างต่อเนื่องตราบใดที่ยังมีการจ่ายเชื้อเพลิงให้แก่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นๆ เชื้อเพลิงที่จ่าย ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงมีได้หลายชนิดด้วยกัน แต่โดยส่วนใหญ่แล้วไฮโดรเจนกับออกซิเจนจะใช้เป็น เชื้อเพลิงหลัก ของเสียที่ได้จากกระบวนการภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะอยู่ในรูปของไอน้ำและ ความร้อน โดยความร้อนที่ได้สามารถนำมาเข้ากระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม (Cogeneration) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น แม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะมีข้อดี อยู่มากแต่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าที่ได้ยังมีข้อจำกัดตรงที่มีความสูญเสียภายในเกิดขึ้นซึ่งเป็น ลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้แล้วเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการผลิตอกมาในเชิงพาณิชย์ยัง รากาก่อนข้างสูงมากเนื่องจากยังไม่สามารถที่จะผลิตได้ในประเทศและต้องนำเข้าจากต่างประเทศที่ สำคัญเมมเบรนที่พัฒนาขึ้นใช้ในปัจจุบันยังมีอายุที่สั้นมาก เช่น 3,000 ชั่วโมง เป็นต้น อีกทั้งยังมี อันตรายหากไม่มีการควบคุมที่ดี เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่ไวไฟและจำเป็นต้องใช้ความรู้ เฉพาะทางเพื่อควบคุมกระบวนการผลิต จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการทดลองและ ทดสอบสำหรับระบบจัดการพลังงานไฟฟ้า

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาและสร้างวงจร จำลองพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบให้สามารถนำไปใช้เป็นกรณีศึกษาได้ทั้งการหา ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ หรือหาความเหมาะสมของขนาดเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อ นำมาใช้งานก่อนที่จะใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงจริง เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็น ประโยชน์สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงอิ่นๆ ที่เกี่ยวข้องและเพื่อส่งเสริมให้งานวิจัยค้าน เซลล์เชื้อเพลิงในประเทศไทยมีมากขึ้น

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างและลักษณะพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

 เพื่อศึกษาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อนำมาสร้างวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์ เชื้อเพลิง

 สึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการควบคุมวงจรเลียนแบบพฤติกรรม เซลล์เชื้อเพลิง

4. ออกแบบและสร้างวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

#### การตรวจเอกสาร

### 1. เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง แก๊สออกซิเจนกับแก๊สไฮโดรเจน ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในยุคแรกๆจะนำเอาแท่ง อิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยแพลตตินั่ม (Platinum Electrodes) สองแท่งคือ แท่งแอโนคและแท่งแคโทด ใส่ในหลอดแก้วที่อัดด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และแก๊สออกซิเจน (O<sub>2</sub>) จุ่มในสารละลายอิเล็กโทร ใส่ต์ (Dilute Acid Electrolyte) ดังภาพที่ 1(ก) และ (ข) ซึ่งอธิบายการเกิดเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและ ทางไฟฟ้า ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้นั้นยังได้กระแสไฟฟ้าออกมาจำนวนน้อยมาก เนื่องจากว่ามีบริเวณพื้นที่หน้าสัมผัสน้อยระหว่างแก๊ส อิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์และระยะห่าง ระหว่างอิเล็กโทรดรวมไปถึงอิเล็กโทรไลต์ที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้มีการ แก้ปัญหาดังกล่าวโดยทำให้อิเล็กโทรดทั้งสองด้านมีขนาดที่แบนเรียบและชั้นของอิเล็กโทรไลต์ที่มี ความบางเพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าสัมผัสในการแพร่ของแก๊สให้มากขึ้นดังภาพที่ 2 ซึ่งเป็นโครงสร้าง พื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบัน









การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าออกมานั้น เพื่อให้เข้าใจ หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ จะใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตรอนเป็นตัวอย่างในการอธิบายการทำงาน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายดังภาพที่ 3



**ภาพที่ 3** การเกิดปฏิกิริยาทางเกมีในเซลล์เชื้อเพลิง

จากภาพที่ 3 สามารถอธิบายกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมีทำให้เข้าใจถึง ที่มาที่ไปของการเกิดอิเล็กตรอน โดยสามารถแยกอธิบายหน้าที่ต่างๆเป็น 4 ส่วนหลักคือ  แอโนด (Anode) เป็นขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจะเป็นส่วนที่ถูกป้อนด้วยแก๊ส ใฮโดรเจน เมื่อแก๊สกระทบตรงขั้วแอโนดที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการออกซิเดชั่น (Oxidation) จะได้อิเล็กตรอนอิสระและโปรตอน (H+) แตกตัวออกจากไฮโดรเจน อิเล็กตรอนที่ได้ จะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แต่จะเคลื่อนที่ไปสู่วงจรภายนอกทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าจ่ายไปยังโหลดจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกหรือแคโทด

 แคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่นเดียวกับขั้วแอโนดเป็นส่วนที่จะมีการป้อนแก๊สออกซิเจนเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) ซึ่งจะทำให้เกิดจะมีการเกิดรวมกันของโปรตอน (H+), อิเล็กตรอน (e-) ของไฮโดรเจน และออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและกวามร้อนขึ้น

อิเล็ก โทร ไลต์ (Electrolyte) เป็นแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยน โปรตอน (Polymer Electrolyte
 Membrane หรือ Proton Exchange Membrane) จะมีลักษณะคล้ายแผ่นพลาสติกใส มีคุณสมบัติคือ
 ยอมให้โปรตอน (H+) ของไฮโครเจนผ่านได้แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอน (e-) ผ่านได้

 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นสารพิเศษที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนและ ไฮโดรเจนให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปทำมาจากแร่แพลตตินั่มเคลือบอยู่บนแผนอิเล็กโทรไลต์โดยจะมี ลักษณะขุรขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสกับแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน

กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมีความต่างศักย์ไฟฟ้าค่อนข้างต่ำประมาณ 0.7 โวลต์ (ธนารัฐ, 2545) ซึ่งมีระดับต่ำกว่าที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ เพื่อให้ได้ระดับความต่างศักย์ตามที่ ต้องการ จึงต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเรียงต่อกันเรียกว่าชุดของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel-cell Stack) ซึ่งมี ลักษณะการต่อกันของเซลล์ย่อยเป็นแบบอนุกรม โดยที่ขั้วแอโนดจะเชื่อมต่อไปยังขั้วแคโทดของ เซลล์เชื้อเพลิงตัวถัดไปแสดงดังภาพที่ 4(ก) และ 4(ข)



(f)



(ข)

ภาพที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันเพื่อเพิ่มแรงคันไฟฟ้า (ก) การต่ออนุกรมเซลล์เชื้อเพลิง (บ) ชุดบองเซลล์เชื้อเพลิง ที่มา: มูลนิชิพลังงานเพื่อสิ่งแวคล้อม (2551)

ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดและสามารถแบ่งออกตามปัจจัยต่างๆ ที่นำมาพิจารณา เช่น แบ่งตามประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ อุณหภูมิในขบวนการเคมีไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น โดย เซลล์เชื้อเพลิงทุกชนิดจะให้พลังงานไฟฟ้าในรูปไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ในปัจจุบัน เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องและนำมาใช้งานได้จริงนั้น แบ่งออกได้เป็น 6 ชนิดหลักๆ ใค้แก่ 1) เซลล์เชื้อเพลิงชนิคแอลกาไลน์ (Alkaline) 2) เซลล์เชื้อเพลิงชนิคป้อนสารเมทานอล โดยตรง (Direct Methanol) 3) เซลล์เชื้อเพลิงชนิคกรคฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) 4) เซลล์-เชื้อเพลิงชนิคเกลือการ์บอเนตหลอม (Molten Carbonate) 5) เซลล์เชื้อเพลิงชนิคออกไซค์ของแข็ง (Solid Oxide) 6) เซลล์เชื้อเพลิงชนิคเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน (Proton Exchange Membrane)

1.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline - AFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนารุ่นแรกๆ และเป็นชนิดแรกที่ใช้ กันอย่างแพร่หลายในโครงการอวกาศของนาซา (National Aeronautics and Space Administration -NASA) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลด์ ประสิทธิภาพของ AFC ค่อนข้างสูงซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ จากการใช้งาน ในอวกาศได้แสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพประมาณ 70% อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ เสียหายง่ายด้วยการ์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในความเป็นจริง CO<sub>2</sub> เพียงเล็กน้อยในอากาศก็สามารถมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ ความไวต่อ CO<sub>2</sub> นี้มีผลต่ออายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้จำเป็นต้องใช้ทั้งไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ เท่านั้น ซึ่งกระบวนการที่ทำให้แก๊สทั้งสองชนิดนี้ให้บริสุทธิ์มีราคาที่ก่อนข้างสูง การออกแบบ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลกาไลน์คล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรดอน หากแต่ใช้ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลด์ ดังภาพที่ 5 แสดงถึงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นโดย ที่ไฮดรอกซิลไอออน (OH-) เกลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวกและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด	:	2H <sub>2</sub> + 4OH-	=>	$4H_{2}O + 4e$
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโนด	:	$O_2 + 4e - + 2H_2O$	=>	40H-
การเกิดปฏิกิริยารวม	:	$2H_2 + O_2$	=>	2H <sub>2</sub> O



**ภาพที่ 5** การเกิดปฏิกิริยาเคมีเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์

1.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol - DMFC)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีลักษณะเหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิคเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตรอน แต่จะใช้เมทิลแอลกอฮอร์ (CH<sub>3</sub>OH) 25 เปอร์เซ็นต์ผสมกับน้ำเป็นเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ ขั้วแอโนคโดยตรง ในตัวเมทิลแอลกอฮอร์จะประกอบด้วยธาตุการ์บอน ไฮโดรเจน และไฮครอก ซิล (-OH) เป็นตัวทำปฏิกิริยา ส่วนออกซิเจนนั้นจะป้อนเข้าที่ขั้วแคโทค ข้อคีของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดนี้คือ ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับถังเก็บเชื้อเพลิงที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดและราคายังถูกกว่า นอกจากนี้ความหนาแน่นของพลังงานที่ได้จากเมทิลแอลกอฮอร์ยังสูงกว่าไฮโดรเจน

การเกิคปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนค	: $CH_3OH+H_2O$	=>	$CO_2 + 6H + + 6e$
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด	: $3/2 O_2 + 6H + 6e$ -	=>	3H <sub>2</sub> O
การเกิดปฏิกิริยารวม	: $CH_3OH + 2/3 O_2$	=>	$CO_2 + 2H_2O$

แม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีข้อดีหลายประการซึ่งเป็นปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ใช้ในการ ดัดสินใจในการเลือกใช้งาน แต่มีข้อเสียคือการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้เมทิลแอลกอฮอร์ที่บริเวณ ขั้วแอโนดนั้นจะช้ากว่าไฮโดรเจนและการเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันกับออกซิเจนที่ขั้วแคโทดที่ สลับซับซ้อนกว่า จึงส่งผลให้ระบบของการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมแล้วช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาใน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ มาก นั่นเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นด่ำกว่าเซลล์ เชื้อเพลิงชนิดอื่น ในภาพที่ 6 แสดงปฏิกิริยาเกมีของเซลล์เชื้อแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง ใน การประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ก่อนข้างมีขีดจำกัดเนื่องมาจากพลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา นั้นด่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงๆ ได้ แต่เนื่องจากมีความ หนาแน่นของพลังงานสูงจากเชื้อเพลิงที่ใช้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าต่อเนื่อง เป็นเวลานาน เช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา หรือเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ เป็น ด้น



ภาพที่ 6 ปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง

1.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรคฟอสฟอริก (Phosphoric Acid - PAFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีการทำงานโดย โปรตอน (+) จะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์รวม ไปถึงปฏิกิริยาเคมีบริเวณขั้วแคโทคและแอโนคด้วย โดยใช้กรคฟอสฟอริก (H3PO4) เข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูง 150 ถึง 220 องศาเซลเซียสได้อย่างมี เสถียรภาพนอกจากนั้นยังทนทานต่อการ์บอนไดออกไซค์ (CO<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นอีกด้วย อิเล็กโทรคที่ใช้ เหมือนกับแบบ PEM โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพลตตินั่มเกลือบอยู่บนกระคาษที่ทำจากการ์บอน ในปัจจุบันจะใช้แพลตตินั่มเคลือบประมาณ 0.05 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่ขั้วแคโทคและ 0.10 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่ขั้วแอโนค แก๊สการ์บอนมอนอกไซค์ (CO) จะทำให้เกิดความ เสียหายที่บริเวณขั้วแอโนคซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการรีฟอร์เมอร์ภายในระบบแต่สามารถที่ทำ ให้บริเวณขั้วแอโนคนั้นลดการดูดซับ CO ได้โดยการให้ทำงานที่อุณหภูมิสูง การทำงานจะแสดงดัง ภาพที่ 7

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอ โนด	:	H <sub>2</sub>	=>	2H++ 2e-
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแค โนด	:	1/2O <sub>2</sub> + 2H+ +2e-	=>	H <sub>2</sub> O
การเกิดปฏิกิริยารวม	:	$H_2 + 1/2O_2$	=>	H <sub>2</sub> O

ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC ถูกผลิตออกมาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว ประสิทธิภาพ การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นถึง 85 เปอร์เซ็นต์หากนำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า แบบความร้อนร่วม (Combined Heat and Power - CHP) ซึ่งอุณหภูมิในการทำงานจัดอยู่ใน ระดับกลาง ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC จะถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับ งานด้านต่างๆ เช่น โรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับชุมชน สำนักงาน บริษัท และ โรงพยาบาล เป็นต้น



ภาพที่ 7 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรคฟอสฟอริก

1.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate - MCFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้เกลือลิเธียมโพแทสเซียมการ์บอเนตหรือลิเธียมโซเดียม-การ์บอเนตหลอมละลายเป็นอิเล็กโทรไลด์ซึ่งจะบรรจุในเมตริกซ์เซรามิกลิเธียมอลูมิเนียมออกไซด์ (LiAIO2) (สมนึก, 2548) ใช้โลหะนิกเกิลที่ขั้วแอโนดและโลหะนิกเกิลออกไซด์ที่ขั้วแคโทดซึ่งทน กวามร้อนสูงนอกจากนี้ยังมีรากาถูกกว่าแพลตดินั่มที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดอื่นๆ เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 ถึง 700 องสาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาเกมีได้ ไอออนการ์บอเนตออกมาซึ่งจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดดังภาพที่ 8 เชื้อเพลิงที่ใช้กับ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือไฮโตรเจนซึ่งจะจ่ายไปยังขั้วแอโนดและออกซิเจนกับการ์บอนไดออกไซด์ จ่ายไปยังขั้วแกโทด ของเสียที่ได้จากกระบวนการจะเป็นน้ำ ความร้อนและการ์บอนไดออกไซด์ จ่ายไปยังขั้วแกโทด ของเสียที่ได้จากกระบวนการจะเป็นน้ำ ความร้อนและการ์บอนไดออกไซด์ จ่ายไปยังขั้วแกโทด ของเสียที่ได้จากกระบวนการจะเป็นน้ำ ความร้อนและกร์บอนไดออกไซด์ จ่ายไปยังขั้วแกโทด ของเสียที่ได้จากกระบวนการจะเป็นน้ำ ความร้อนและลาร์บอนไดออกไซด์ สามารถใช้กวามร้อนภายในตัวเซลล์มาทำการแยกการ์บอนไดออกไซด์ออกมา ทำให้ประหยัด ด้นทุน ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้อยู่ที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์และถ้านำมาผลิตไฟฟ้า แบบกวามร้อนร่วมก็จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงาน ที่อุณหภูมิสูงมากจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในที่อยู่อาศัยหรือยานพาหนะ โดยปกติแล้วจะนำไปใช้ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม





ภาพที่ 8 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม ที่มา: สมนึก (2548)

1.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซค์ของแข็ง (Solid Oxide - SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิในการทำงานสูงสุดประมาณ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส สามารถให้ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ พลังงานความร้อนที่แผ่ออกมาของ SOFC สามารถที่จะนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าแบบความร้อน ร่วมได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้นถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC นี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชนิด PAFC และ PEM นอกจากจะให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตที่ดีกว่าแล้ว เชื้อเพลิงยังสามารถใช้ได้ทั้ง ไฮโดรเจน การ์บอนมอนนอกไซด์ แอลกอฮอล์และไฮโดรการ์บอน ดังนั้นจึงสามารถนำเอาแก๊สการ์บอนมอน นอกไซด์จากถ่านหินเข้ามาใช้ร่วมได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับ SOFC นั้นยังมีราคาที่ถูกเนื่องจาก ทำงานที่อุณหภูมิสูงสามารถที่จะใช้โลหะที่ไม่มีค่าทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ยังมีเสถียรภาพการทำงานสูงและอายุการใช้งานของเซลล์นานเนื่องจากส่วนประกอบนั้น เป็นของแข็ง

ส่วนประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC จะประกอบด้วย ขั้วแอโนด อิเล็กโทร ไลต์ ขั้วแกโทดและตัวเชื่อมต่อ (Interconnect) การทำงานจะจ่ายอากาศไปยังขั้วแกโทด เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารวมตัวกันของอากาศ ส่วนเชื้อเพลิงจะจ่ายไปยังขั้วแอโนดแสดงดังภาพที่ 9 เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูง ออกซิเจนไอออนสามารถวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ได้เพื่อไปทำปฏิกิริยากับ เชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนดทำให้ได้ของเสียคือ ความร้อนกับน้ำและอิเล็กตรอนออกมาส่งไปยังโหลด ไฟฟ้าและไหลกลับมายังขั้วแกโทดเพื่อทำปฏิกิริยากับอากาศเพื่อให้ได้ออกซิเจนไอออนออกมา

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอ โนด	:	$2H_2 + 2O_2$ -	=>	$2H_2O + 4e$
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแค โนด	:	O <sub>2</sub> + 4e-	=>	20 <sub>2</sub> -
การเกิดปฏิกิริยารวม	:	$2H_{2} + 2O_{2}$	=>	2H <sub>2</sub> O



ภาพที่ 9 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซค์ของแข็ง ที่มา: สมนึก (2548)

 1.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน (Proton Exchange Membrane -PEM)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane -PEM) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่ออิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ (Polymer electrolyte membrane - PEM) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาใน ปี ค.ศ. 1960 เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในยานอวกาศขององค์การ NASA ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ใช้ โพลิเมอร์แข็งซึ่งจะทำงานที่อุณหภูมิที่ค่ำประมาณ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อคีคือจะทำให้เซลล์-เชื้อเพลิงสามารถเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติได้ในระยะเวลาอันสั้น อีกทั้งแต่ละเซลล์ยังมีขนาคที่ บาง ส่งผลให้น้ำหนักโดยรวมค่อนข้างเบา นอกจากนั้นแล้วการสึกกร่อนของดัวเซลล์ยังมีน้อย มี การนำเซลล์เชื้อเพลิงชนิคนี้มาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพราะสามารถใช้เป็นแหล่ง ผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาคเล็กไปจนถึงแหล่งกำเนิคพลังงานไฟฟ้า ขนาดใหญ่ได้เช่น เซลล์เชื้อเพลิงที่มีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าน้อยๆ สามารถนำไปใช้กับ โทรศัพท์มือถือหรือเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา ขนาคเป็นกิโลวัตต์จะนำไปใช้เป็นเครื่องกำเนิด ้ไฟฟ้าภายในอาคารที่พักอาศัย ขนาคสิบกิโลวัตต์จะนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิคไฟฟ้าในรถไฟฟ้า ถ้า เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีขนาคสูงถึง 300 กิโลวัตต์แล้วก็เหมาะที่จะใช้ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถบัสหรือรถโดยสารได้

สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาคือ ไฮโดรเจนและออกซิเจนจาก อากาศดังในภาพที่ 10 โดยจะทำการป้อนไฮโครเจนเข้าทางด้านขั้วแอโนด ทำให้เกิดการแตกตัวได้ โปรตอน (H+) และอิเล็กตรอน โดยโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทด ในขณะ ที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปตามสายไฟสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า (ภาระทางไฟฟ้า) และไหลกลับมายังขั้ว แกโทด ส่วนออกซิเจนที่ทำการป้อนที่ขั้วแกโทดจะเป็นตัวทำให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตอน และอิเล็กตรอนของไฮโดรเจน ได้ผลลัพธ์เป็นน้ำและความร้อนออกมาดังสมการต่อไปนี้

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอ โนด	:	2H <sub>2</sub>	=>	4H++4e
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแก โนด	:	$O_2 + 4e - + 4H +$	=>	2H <sub>2</sub> O
การเกิดปฏิกิริยารวม	:	$2H_2 + O_2$	=>	2H <sub>2</sub> O



ภาพที่ 10 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน

#### 2. คุณลักษณะของพลังงานใฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการของ กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า การวัดค่าของพลังงานไฟฟ้าออกมาจะอยู่ในรูปของความหนาแน่นของ กระแสคือ ปริมาณกระแสที่วัดได้ต่อหน่วยพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง (ในหน่วย mA/cm<sup>2</sup>) ซึ่งสามารถนำมาพิจารณาเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความ หนาแน่นของกระแส (I – V Characteristic Curve) ดังภาพที่ 11 โดยค่าของแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์ เชื้อเพลิงที่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีนั้นในอุดมคติระดับแรงดันไฟฟ้าจะได้ดังสมการที่ 1

$$E = \frac{-\Delta \overline{g}f}{2F}$$
(1)

โดยที่ E = ค่าของแรงคันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงอุคมคติ - $\Delta_{
m gf}^-$  = พลังงานที่ปล่อยออกมาจากการเกิคปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ F = ค่าคงที่ของฟาราเคย์ซึ่งเท่ากับ 96485 คูลอมบ์



ภาพที่ 11 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงคันใฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

ค่าของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าโดยประมาณ 1.2 โวลต์ที่สภาวะไม่มีการต่อภาระทาง ไฟฟ้าทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสแต่เมื่อได้ทำการต่อภาระทางไฟฟ้าภายนอกเข้ามา ใช้งานขนาดแรงคันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าลดลงซึ่งจะมีค่าแปรผันตามค่าของกระแสที่เพิ่มขึ้น สาเหตุที่ ทำให้ลักษณะของกระแสและแรงคันของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะคังภาพที่ 11 เนื่องมาจากค่าความ สูญเสียภายใน ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยหลายอย่างค้วยกันเช่น ปฏิกิริยาเคมี สารเคมีที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิในการทำงาน วัสคุที่ใช้ในการสร้าง ความคันแก๊สในระบบ เป็นค้น ค่าความสูญเสีย สามารถแบ่งออกได้ 3 สาเหตุหลักด้วยกันได้แก่ การสูญเสียการกระตุ้น (Activation loss) การ สูญเสียจากความค้านทานภายใน (Ohmic loss) และการสูญเสียจากความเข้มข้นของเชื้อเพลิง (Concentration loss) โดยมีรายละเอียคต่างๆคังนี้

2.1 การสูญเสียการกระตุ้น (Activation losses)

การสูญเสียการกระตุ้นเกิดเนื่องจากผลของปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณพื้นผิวของขั้วอิเล็ก-โทดทั้งสองในช่วงแรกปฏิกิริยาบริเวณขั้วไฟฟ้าจะก่อนข้างช้าส่งผลทำให้แรงคันของเซลล์เชื้อเพลิง ไม่เป็นตามอุดมคติขนาดของแรงคันไฟฟ้ามีก่าลดลงโดยสามารถอธิบายได้ในภาพที่ 12 กราฟเท-เฟิล (Tafel plot) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงกวามแตกต่างของกวามเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่มีผลต่อ แรงคันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในเส้นกราฟที่มีกวามชันมากปฏิกิริยาทางเกมีจะเกิดขึ้นได้ ช้าส่วนในเส้นกราฟที่มีกวามชันน้อยปฏิกิริยาทางเกมีจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่า



ภาพที่ 12 ลักษณะรูปกราฟแสดงความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาเคมีที่เกิดช้าและเร็ว

สามารถเขียนเป็นสมการความแตกต่างของแรงคันบริเวณแรงคันความสูญเสียการ กระตุ้นได้ดังนี้

$$V_{act} = A.ln\left(\frac{i}{i_0}\right)$$
(2)

โดยที่

V<sub>act</sub> = แรงดันสูญเสียจากการกระตุ้น

A = ค่าความชั้นของสมการเทเฟิล (Tafel Plot)

i = ความหนาแน่นของกระแส (mA/cm<sup>2</sup>)

i \_ ความหนาแน่นของกระแสแลกเปลี่ยนแปลง (mA/cm<sup>2</sup>)
จากสมการที่ 2 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า A มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่จะส่งผลถึง พลังงานไฟฟ้าที่ออกมาซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่ากระแส i<sub>o</sub> โดยสามารถสังเกตได้จากจุดตัดแกน ความหนาแน่นของกระแสถ้ากระแส i<sub>o</sub> มีค่ามากปฏิกิริยาทางเคมีก็จะเกิดขึ้นได้เร็ว จากกราฟเท-เฟิลยังเป็นตัวบ่งบอกถึงพฤติกรรมของอิเล็กโทรคได้อีกด้วย

2.2 การสูญเสียจากความด้ำนทานภายใน (Ohmic losses)

ความสูญเสียแรงคันไฟฟ้าจากความด้านทานภายในนี้เกิดจากผลกระทบความต้านทาน การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วไฟฟ้า เนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างมีประสิทธิภาพใน การนำไฟฟ้าที่ไม่ดีและความด้านทานการไหลไอออนของไฮโครเจนผ่านแผ่นเยื่อเมม เบรนอิเล็กโทรไลต์จากขั้วแอโนคไปยังขั้วแกโทคโดยอาจเกิดจากแผ่นเยื่อเมมเบรนอิเล็กโทรไลต์มี ความชื้นไม่เพียงพอเพราะการเคลื่อนที่ของไอออนจำเป็นต้องใช้น้ำเป็นตัวช่วยในการเคลื่อนที่ ดังนั้นความสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานภายในเกิดจากความด้านทานในแต่ละส่วนของตัว เซลล์เชื้อเพลิงเอง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$V_{Ohm} = i.r$$
(3)

โดยที่ V<sub>Ohm</sub> = แรงดันสูญเสียจากความด้านทาน i = ความหนาแน่นของกระแส (mA/cm<sup>2</sup>) r = ความด้านทานของพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา (kΩ/cm<sup>2</sup>) จากสมการที่ 3 จะเห็นว่าสามารถลดความสูญเสียจากความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง สามารถทำให้ดีขึ้นได้ โดยการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าให้มีก่าความนำของกระแสไฟฟ้าที่สูงเพื่อลดแรง ด้านทานการกลื่อนที่ของอิเล็กตรอน นอกจากนี้ในส่วนของเยื่อเมมเบรนแผ่นอิเล็กโทรไลต์นั้นควร จะมีการออกแบบให้มีขนาดบางที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้เพื่อให้ไอออนของเชื้อเพลิงสามารถ เกลื่อนที่ผ่านได้เร็วขึ้น

2.3 การสูญเสียจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (Concentration losses)

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ง่ายให้กับเซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงาน ไฟฟ้าในอัตราที่เร็วส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงในขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งทำให้ความ เข้มข้นหรือความดันของแก๊สนั้นลดลงทำให้แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านในชั้นต่างๆ ภายในตัวเซลล์ เชื้อเพลิงได้เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นผลทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมานั้นลดลงสามารถ เขียนความสัมพันธ์ในรูปของสมการดังนี้

$$V_{\text{Con}} = Bln \left( 1 - \frac{i + i_n}{i_1} \right)$$
(4)

โดยที่

V<sub>cm</sub> = แรงคันสูญเสียจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

- B = ค่าคงที่ของการถ่ายเทมวลสาร
- i = ค่าความหนาแน่นกระแสพิกัด (mA/cm<sup>2</sup>)
- i = ค่าความหนาแน่นกระแสภายใน (mA/cm<sup>2</sup>)
- i = ค่าความหนาแน่นกระแส (mA/cm<sup>2</sup>)

จากสมการทั้งหมดสามารถนำมาคำนวณหาค่าแรงคันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่แท้จริง ได้โดยการนำค่าความสูญเสียทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงมาหักล้างกับแรงคันไฟฟ้าในอุดมคติ ซึ่ง ได้ค่าแรงคันไฟฟ้าแปรผันตามขนาดของความหนาแน่นของกระแสดังสมการที่ 5

$$V = E - V_{Ohm} - V_{Act} - V_{Con}$$
<sup>(5)</sup>

### 3. ระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิง

นอกจากตัวเซลล์เชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การกำเนิดพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ยังต้องอาศัยการทำงานของระบบต่างๆ ร่วมกันได้แก่ ชุดเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันแบบอนุกรม (Fuel Cell Stack) ถังเก็บไฮโดรเจน วาล์วควบคุมความดัน ตัวปรับความชื้น เป็นต้น ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 องค์ประกอบโดยรวมทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิง ที่มา: มูลนิชิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (2551) จากภาพที่ 13 เป็นระบบตัวอย่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ขนาดกำลังไฟฟ้า500 วัตต์มี จำนวนเซลล์ทั้งสิ้น 23 เซลล์สร้างโดยบริษัท ZSW ประเทศเยอรมนี มีพิกัดกระแส 40 แอมป์และ พิกัดแรงดันประมาณ 12.5 โวลต์และที่ไม่มีโหลดประมาณ 23 โวลต์ ในระบบจะมีถังเชื้อเพลิง ไฮโดรเจนทำหน้าที่จ่ายไฮโดรเจนให้กับเซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วแอโนดโดยจะผ่านวาล์วปรับ อัตราการไหลเชื้อเพลิง ส่วนทางด้านขั้วแคโทดจะมีการป้อนแก๊สออกซิเจนที่ได้จากคอมเพรสเซอร์ ผ่านตัวปรับกวามชื้น (Humidifier) เพื่อทำให้ไอออนสามารถไหลผ่านเยื่อเมมเบรนได้ดียิ่งขึ้น เชื้อเพลิงส่วนเกินที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะถูกขับออกด้วยวาล์วควบคุมความ ดันของทั้ง 2 ขั้ว นอกจากนี้ในระบบยังมีตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Exchange) เพื่อลดความร้อน ภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงให้ทำงานอยู่ในระดับอุณหภูมิที่พอเหมาะ

### 4. การนำเซลล์เชื้อเพลิงไปประยุกต์ใช้งาน

ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุผลที่ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการผลิตอื่นๆ อีกทั้งยังไม่ ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมายโดยสามารถแบ่งเป็นหัวข้อหลักๆ ดังนี้

### 4.1 แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบพกพา

เซลล์เชื้อเพลิงที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานคือแบบ DMFC เนื่องจากว่ามีความหนาแน่น ของพลังงานที่สูงจากเชื้อเพลิงที่ใช้จึงสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้นานกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอื่น แต่ให้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำ จึงได้นำไปใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆเช่น เครื่อง คอมพิวเตอร์แบบพกพา, โทรศัพท์มือถือ, เครื่องชาร์จแบตเตอรี่หรือสำหรับเครื่องช่วยฟัง เป็นต้น ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกชนิดต่างๆ (ก) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา (ง) โทรศัพท์มือถือ ที่มา: ถิรพัฒน์ (2549)

4.2 แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับยานยนต์

เซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานในส่วนนี้มากที่สุดจะเป็นแบบ PEM เนื่องจากมีอุณหภูมิในการทำงานต่ำประมาณ 75 องศาเซลเซียสให้กำลังไฟฟ้าที่สูง อายุการใช้งาน นานและมีความทนทาน มีประสิทธิภาพสูงกว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้กระบวนการ สันดาปภายในถึง 3 เท่า นอกจากนี้แล้วยังไม่ก่อให้เกิดมลพิษในอากาศอีกด้วย ส่วนประกอบภายใน รถยนต์แสดงดังภาพที่ 15 มีอยู่ด้วยกันหลายส่วนได้แก่ ชุดของเซลล์เซื้อเพลิง ระบบแปลงผัน พลังงานไฟฟ้า แหล่งจ่ายเชื้อเพลิง มอเตอร์ขับเคลื่อน เป็นต้น



ภาพที่ 15 รถยนต์ที่ใช้ระบบพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง ที่มา: ธนารัฐ (2545)

จากภาพที่ 15 สามารถอธิบายส่วนต่างๆ ของรถยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงคังนี้

หมายเลข 1 คือ ถังเก็บพลังงานเชื้อเพลิงไฮโครเจนสำหรับจ่ายให้กับตัวเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า

หมายเลข 2 คือ อากาศที่ได้มาจากคอมเพรสเซอร์ (Compressor) ภายในรถยนต์เพื่อ แจกจ่ายให้กับเซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วแคโทด

หมายเลข 3 คือ ออกซิเจนจากอากาศและ ไฮโครเจนจากรีฟอร์เมอร์ (Reformer) ทำให้ เกิดพลังงานไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อส่งไปยังหน่วยควบคุมพลังงานไฟฟ้า

หมายเลข 4 คือ หน่วยกวบคุมพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่ในการ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อขับมอเตอร์สำหรับหมุนล้อรถยนต์

#### 4.3 แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่

เทกโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้มีประสิทธิภาพเพียง พอที่จะทดแทนโรงไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเช่น โรงงานไฟฟ้าถ่านหินหรือน้ำมัน โรงงานไฟฟ้า พลังน้ำ เป็นต้นซึ่งเมื่อเทียบประสิทธิภาพแล้วโรงงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิงจะให้ ประสิทธิภาพที่สูงกว่า สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ผลิตเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้า ขนาดใหญ่ดังภาพที่ 16 นี้จะมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ แบบ SOFC แบบ PAFC และแบบ MCFC เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงเหล่านี้จะทำงานที่อุณหภูมิสูงคือ อยู่ที่ประมาณ 200 – 1000 องศาเซลเซียส สามารถนำเอาความร้อนที่ได้ไปผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combine Heat Power - CHP) ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้นจาก 60 เปอร์เซ็นต์เป็น 85 เปอร์เซ็นต์



# ภาพที่ 16 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PAFC ขนาด 200 กิโลวัตต์ Source: Larminie and Dicks (2003)



ภาพที่ 17 ตัวอย่างระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

4.4 แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าบนยานอวกาศ

เซลล์เชื้อเพลิงที่นิยมใช้ในการใช้งานบนยานอวกาศของ NASA จะเป็นแบบแอล-กาไลน์ ดังภาพที่ 18 ถือได้ว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแรกที่มีการพัฒนาในรุ่นแรกๆ มีประสิทธิภาพ ในการทำงานของกระบวนการสูงสุดประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ สามารถที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าและ น้ำสำหรับบริโภคบนอวกาศได้เนื่องจากว่าใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์มาก นอกจากนี้ยังมี อุณหภูมิในการทำงานที่ต่ำมากอยู่ที่ประมาณ 23 -70 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 18 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 1.5 kW ที่ใช้บนยานอวกาศอพอลโล Source: Larminie and Dicks (2003)

### 5. ข้อดีและข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิง

5.1 ข้อคีของเซลล์เชื้อเพลิง

5.1.1 เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาคปลอคภัยต่อสิ่งแวคล้อมโคยไม่ก่อให้เกิดแก๊ส การ์บอนไคออกไซด์ นอกจากนี้ยังเป็นพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนเนื่องจากปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้ สามารถใช้งานจริงได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถลดการใช้น้ำมันและลดการนำเข้าน้ำมันได้ใน อนากต

5.1.2 มีประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าทั่วไปเพราะว่าเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ ผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรทำให้ไม่สูญเสียพลังงานไปกับความร้อนหรือการ เผาไหม้

5.1.3 ใช้พื้นที่ในการติดตั้งเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับแจกจ่าย เช่น ใช้ พื้นที่เพียงแค่สนามเทนนิสก์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 2 เมกกะวัตต์ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการ ดูแลรักษาและไม่เกิดเสียงดังในขณะที่ทำงาน

5.1.4 เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานในย่านอุณหภูมิสูงๆ สามารถนำความร้อนที่ได้มาผลิต เป็นกระแสไฟฟ้าได้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 80 เปอร์เซนต์ได้

5.2 ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิง

5.2.1 ไม่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในตัวเซลล์เชื้อเพลิงได้ซึ่งจะต้องจ่ายเชื้อเพลิง ตลอดเวลาเพื่อให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

5.2.2 ราคาเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันนั้นยังมีราคาที่แพงมากโดยจะอยู่ที่ประมาณ 135,000 บาทต่อกิโลวัตต์และประสิทธิภาพยังลดลงตามความหนาแน่นของพลังงาน 5.2.3 การขนส่งและการจัดเก็บแก๊สไฮโดรเจนซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อนำไปใช้งานจึงต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นแก๊สที่ไวไฟอาจจะก่อให้เกิด อันตรายได้

5.2.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดยังทำงานในย่านอุณหภูมิที่ก่อนข้างสูง เช่น SOFC PAFC และ MOFC เป็นต้น ซึ่งมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

5.2.5 ลักษณะแรงคันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะสูงสุคเมื่อไม่มีกระแสไหลและจะ ลคลงขณะที่กระแสเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาและความต้านทานภายใน ทำให้การตอบสนอง ทางด้านของสภาวะโหลดได้ไม่ดีพอ

# งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่ได้กล่าวแล้วในเบื้องต้นเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่าในปัจจุบันและในอนาคต ข้างหน้าเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญในการคำเนินชีวิตมากขึ้นเพราะจะเป็นแหล่งผลิต พลังงานไฟฟ้าที่สำคัญที่จะมาแทนที่การผลิตพลังงานไฟฟ้าในรูปของกระบวนการอื่นและยังเป็น มิตรต่อสิ่งแวคล้อมซึ่งในปัจจุบันได้ให้ความใส่ใจเป็นอย่างมาก นอกจากนั้นแล้วยังช่วยลคการ นำเข้าของพลังงานอาทิเช่น น้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องสำหรับแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีรายละเอียคดังนี้

Yuvarajan and Dachuan (2004) ได้เสนองานวิจัยเรื่องคุณลักษณะและการจำลองเซลล์-เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน โดยงานวิจัยนี้ได้นำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ เป็นต้นเพื่อใช้เลียนแบบพฤติกรรม และสภาวะการทำงานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์ แรงดันสามารถแปรผันได้ตั้งแต่ 26 โวลต์ถึง 43 โวลต์มีและมีก่าของกระแสไฟฟ้า 46 แอมแปร์ นอกจากนี้ได้บอกถึงปัจจัยที่มีผลต่อ การแปรผันของแรงดันนั้นเกิดมาจากก่าความสูญเสียภายในซึ่งได้แก่ Activation Polarization, Ohmic Polarization และ Concentration Polarization (Mass Transportation Losses) เซลล์เชื้อเพลิง ที่นำมาจำลองในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เนื่องจากมองเห็นถึงกวามสำคัญตรงที่มี อุณหภูมิการทำงานที่ก่อนข้างต่ำประมาณ 30 – 100 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพการผลิต กระแสไฟฟ้าที่ได้ก่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแบบ DMFC ปัจจุบันจึงเริ่มนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุด Famouri and Gemmen (2003) เสนองานวิจัยวงจรจำลองปฏิกิริยาเคมีภายในของเซลล์-เชื้อเพลิงชนิด PEM โดยจำลองการทำงานในส่วนต่างๆของเซลล์เซื้อเพลิงเช่น ขั้วแค โทด ขั้วแอ โนด เชื้อเพลิง อากาศ เป็นต้น แล้วนำส่วนที่จำลองมาประกอบรวมกันเป็นวงจรจำลองการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิง มีประ โยชน์ที่จะนำมาออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM และการวิเคราะห์ทดสอบ กับภาระ โหลดกับตัวเซลล์เชื้อเพลิงทำให้สามารถนำมาออกแบบระบบควบคุมพลังงาน ไฟฟ้าเพื่อใช้ กับที่พักอาศัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการในการจำลองจะใช้สมการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย ซึ่งจะแทนสภาวะการทำงานต่างๆ ภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง แล้วนำมาประยุกต์สมการทาง คณิตศาสตร์เข้ากับวงจรไฟฟ้า ผลการทดลองที่ได้จะใช้โปรแกรม PSPICE ในการตรวจสอบผล

Sadli et al. (2004) เสนองานวิจัยพฤติกรรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำของเซลล์-เชื้อเพลิงชนิด PEM โดยในงานวิจัยจะหาแบบจำลอง 2 กรณีกือ การทำงานในสภาวะอยู่ตัวและ กวามด้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง โดยในงานวิจัยนี้จะจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด กำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ จำนวน 23 เซลล์ เพื่อทดสอบกับระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบูสคอนเวอร์ เตอร์สำหรับยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดที่เหมาะสมและเพื่อลดข้อด้อยของพฤติกรรมการ ทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างผลที่ได้จากการทำลอง จริงกับผลที่ได้จากแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้นำเสนอ ผลการทดลองที่ได้พบว่าสามารถจำลอง พฤติกรรมจากเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อทำการทดสอบได้เหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงจริงทั้งสภาวะการ ทำงานอยู่ตัวและสภาวะทางพลวัต

Garnier et al. (2003) เสนองานวิจัยแบบจำลองทางพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิค PEM สำหรับประยุกต์ใช้งานกับยานยนต์ แบบจำลองที่นำเสนอจะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะ ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่มาจากการวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยมีทั้ง การจำลองที่สภาวะอยู่ตัวและสภาวะพลวัต ในส่วนของสภาวะอยู่ตัวจะใช้หลักการคำนวณทางด้าน แรงคันไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดแล้วทำการเปรียบเทียบก็จะได้ขนาดแรงคันของเซลล์-เชื้อเพลิงในการจำลอง ทางด้านสภาวะพลวัตจะกิดค่าความต้านทานของตัวเซลล์เชื้อเพลิงเช่น ความ ต้านทานการไหลของอิเล็กตรอน ความต้านทานการแพร่ของแก๊ส ความต้านทานของชั้นเยื่อเมม เบรน เป็นต้น โดยใช้จำลองเซลล์เชื้อเพลิงขนาค 3 เซลล์ทคสอบกับสภาวะของกระแสที่ 10, 15, 35 แอมป์บนโปรแกรม Matlab Simulink เพื่อดูการตอบสนองของแบบจำลองพบว่าสามารถเลียนแบบ พฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสภาวะอยู่ตัวและพลวัต ทำให้สามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปวิเคราะห์ เพื่อหาความเหมาะสมในการนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้สำหรับยานยนต์ได้อย่างถูกต้อง

### อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

- 1. คอมพิวเตอร์ Pentium 4 2.66 GHz RAM 512 MB
- 2. โปรแกรม MATLAB 7
- 3. ชุดโปรแกรมใมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ICD2
- 4. ไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล PIC 16F877
- 4. ซอฟแวร์พัฒนา MPLAB version 8.10
- 5. ออสซิสโลสโคป
- 6. มัลติมิเตอร์
- 7. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ IGBT, DIODE
- 8. อุปกรณ์ระบายความร้อน Heat Sink
- 9. ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ
- 10. ชุดอุปกรณ์ป้องกัน CIRCUIT BREAKER, FUSE
- 11. ตัวต้านทานวัตต์สูงสำหรับใช้ในการทดสอบ

#### ີວີ້ສີ່ຄາຈ

ในงานวิจัยวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง เริ่มจากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ โกรงสร้างและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นศึกษาหลักการของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อนำมาทำการสร้างเป็นวงจรต้นแบบ โดยเราจะมุ่งเน้นในการเลียนแบบกระแสและแรงคันไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิง ให้แปรผันตามลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนั้นๆ โดยมีขั้นตอนของ กระบวนการดังนี้

### 1. การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบที่ได้ทำการวิจัยและสร้างเพื่อทคสอบจะประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กำลังโดยมีส่วนประกอบหลักๆ ด้วยกันหลายส่วนดังภาพที่ 19 ซึ่งประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส จากไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามเฟส วงจรแปลงผันไฟตรงแบบแปลงลง (Buck Converter), วงจรตรวจจับสัญญาณทางไฟฟ้าทั้งแรงดันและกระแส ชุดขับสวิตช์ จอแสดงผลแบบ LCD ตัวควบกุม ชุดโหลดสำหรับทคสอบ เป็นต้น โดยในแต่ละส่วนจะแสดงถึงการออกแบบ เพื่อให้ได้ตัวอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งมีรายละเอียดคังภาพที่ 20 นอกจากนี้จะ กล่าวถึงวิธีการควบคุมของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอรวมไปถึงการจำลอง ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันความถูกต้องก่อนที่จะไปประยุกต์ใช้ในการทดลองจริง



ภาพที่ 19 บล็อกไดอะแกรมวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง



ภาพที่ 20 ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

#### 2. วงจรเรียงกระแสสามเฟส

วงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสดังแสดงในภาพที่ 20 มีไว้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงกำลังงานสูงให้กับวงจรแปลงผันพลังงานไฟตรงแบบแปลงลง โดยใช้หม้อแปลงที่มี ขนาดแรงดันทุติยภูมิเท่ากับ 55 โวลต์และกระแสพิกัด 15 แอมป์ จำนวน 3 ลูกต่อแบบวาย – เดลต้า (Y - Δ) ดังภาพที่ 21 เพื่อให้แรงดันระหว่างสายเท่ากับแรงดันในเฟส โดยเมื่อทำการเรียง กระแสออกมาผ่านวงจรเรียงกระแสสามเฟสจะได้ระดับแรงดันไฟตรงที่มีขนาดประมาณ 80 โวลต์ จากนั้นใช้ตัวเก็บประจุ C เพื่อทำการกรองแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) ออกไประดับแรงดัน ที่ออกแบบไว้สามารถนำไปใช้เลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดแรงดันตั้งแต่ 10 –70 โวลต์และ ขนาดกระแสไม่เกิน 15 แอมป์อาร์เอ็มเอส (RMS – Root Mean Square)



ภาพที่ 21 วงจรเรียงกระแสสามเฟส

ในงานวิจัยนี้จะใช้เลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดแรงคันขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้าสูงสุด ไม่เกิน 60 โวลต์และขนาคกระแสไม่เกิน 15 แอมป์ เมื่อทำการกำหนดขอบเขตของขนาดแหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายให้กับระบบได้แล้วก็สามารถทำการเลือกค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรได้เช่น ขนาดของไคโอคสำหรับเรียงกระแส ค่าตัวเก็บประจุเพื่อใช้กรองแรงคัน เป็นต้น โดยมีรายละเอียด ในการออกแบบก่าอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

2.1 การเลือกค่าตัวเก็บประจุกรองแรงคันไฟตรง

แรงคันไฟตรงที่ผ่านการเรียงกระแสนั้นยังมีส่วนของรูปคลื่นกระแสสลับปนออกมาจึง ด้องทำการกรองในส่วนของแรงคันกระเพื่อมส่วนเกินนี้ออกไปโดยการใช้ตัวเก็บประจุซึ่งจะทำให้ แรงคันค้านออกของวงจรเรียงกระแสมีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้กำหนดให้แรงคัน ค้านออกเท่ากับ 80 โวลต์ยอมให้มีแรงคันกระเพื่อมไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ของแหล่งจ่ายที่กระแส สูงสุด 15 แอมป์ จากข้อกำหนดคังกล่าวสามารถหาก่าตัวเก็บประจุได้จากสมการคังต่อไปนี้คือ

$$C = \frac{I_{dc} \times T}{V_{ripple}}$$
(6)

ดังนั้นจากสมการจะได้  $C = \frac{15 \text{ A} \times 3.33 \times 10^{3} \text{ us}}{3.2 \text{ V}}$ 

จากสมการที่ 6 สามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุได้ประมาณ 15,609 ไมโครฟารัด สามารถทนแรงคันทางค้านออกได้ 2 เท่าคือ 160 โวลต์ ซึ่งจากค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ในการ นำมาใช้เพื่อออกแบบการใช้งานจริง ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 3,300 ไมโครฟารัด 450 โวลต์ ชนิดอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic) ซึ่งมีจำหน่ายในประเทศไทย โดยนำมาต่อขนานกัน 5 ตัวซึ่งจะได้ก่าตัวเก็บประจุโดยรวมทั้งหมด 16,500 ไมโครฟารัด ซึ่งมีก่าที่ใกล้เคียงกับก่าที่คำนวณ และยังสามารถรองรับขนาดกระแสส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นในขณะที่สามารถรักษาระดับการกระเพื่อม ของแรงคันตามที่ได้ออกแบบไว้

2.2 การเลือกขนาดใดโอดเรียงกระแส

การเลือกขนาดของไดโอดจะใช้หลักในการเลือก 2 อย่างคือ เลือกขนาดกระแสและ เลือกขนาดของแรงดัน โดยการเลือกขนาดกระแสจะเลือกที่ค่ากระแสไดโอดมีค่า 1.5 เท่าของ ค่ากระแสสูงสุดที่หม้อแปลงสามารถจ่ายได้คือ 15 แอมป์ดังนั้นจะเลือกใช้ไดโอดที่รองรับกระแส ประมาณ 22.5 แอมป์ ส่วนทางด้านของแรงดันจะเลือกให้มีขนาดมากกว่า 2 เท่าของแรงดัน แหล่งจ่ายคือ 160 โวลต์ ในทางการออกแบบใช้งานจริงจะเลือกใช้ไดโอดเบอร์ RHRG30120 รองรับขนาดกระแส 30 แอมป์และมีขนาดแรงดัน 1200 โวลต์ ในการเลือกใช้ที่ขนาดแรงดันสูง เพราะไดโอดที่มีจำหน่ายในประเทศไทยมีที่กระแสสูงและแรงดันสูง

หลังจากการออกแบบค่าอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หม้อแปลง, ค่าตัวเก็บประจุ, ขนาดของ ใดโอคเรียงกระแส เป็นต้น วงจรแหล่งจ่ายสำหรับใช้งานจริงได้ถูกสร้างขึ้นดังแสดงดังภาพที่ 22 โดยที่ภาพที่22 (ก) คือ หม้อแปลงสามเฟส และภาพที่ 22 (ข) คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟส



(ก)



แผงระบายความร้อน

(ป)

ภาพที่ 22 ต้นแบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่สร้างเสร็จ (ก) หม้อแปลงไฟฟ้าต่อแบบสามเฟส

(ข) ชุดวงจรเรียงกระแสกับชุดตัวเก็บประจุ

#### 3. วงจรแปลงผันไฟตรงแบบแปลงลง (Buck Converter)

วงจรแปลงผันไฟตรงแบบแปลงลงหรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์นี้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ สามารถทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรมีระดับต่ำกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจร เสมอ (วีระเชษฐ์ และ วัฒิพล, 2547) วงจรนี้ถือได้ว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญในการใช้ปรับระดับ แรงดันไฟฟ้าให้เป็นไปตามลักษณะพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงได้ ในการควบคุมจะทำการปรับ ก่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) ของอุปกรณ์สวิตช์ในอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่สวิตช์ นำกระแสกับคาบการสวิตช์ (Switching Period) การทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรงแบบบัคคอน-เวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง (CCM) ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ช่วงการ ทำงานดังภาพที่ 23 คือ ช่วงการทำงานที่ 1 ( $0 < t \le DT_s$ ) ขณะสวิตช์ปีดวงจรไดโอดจะเปิดวงจร และช่วงการทำงานที่ 2 ( $DT_s < t \le T_s$ ) ขณะสวิตช์เปิดวงจรไดโอดจะปีดวงจร นอกจากนี้ลักษณะ ของกระแสกับแรงดันของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 23 การทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (ก) ขณะสวิตช์นำกระแส (ข) ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส





ภาพที่ 24 ลักษณะของรูปคลื่นของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดกระแสต่อเนื่อง (ก) แรงคันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (ข) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (ค) กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

3.1 การทำงานช่วงที่ 1 ขณะสวิตช์นำกระแส ( $0 < t \le DT_s$ )

เมื่อสวิตช์ทำงานไดโอดจะถูกไบอัสกลับ (Reverse Bias) ในช่วงเวลานี้กระแสไฟฟ้าจะ ใหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านขดลวดเหนี่ยวนำไปยังโหลด กระแส i<sub>L</sub> จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิง เส้นดังภาพที่ 24 (ข) โดยที่พลังงานไฟฟ้าจะสะสมที่ขดลวดเหนี่ยวนำ L ในรูปของสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า ส่วนรูปคลื่นของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L จะแสดงดังภาพที่ 23 (ก) จากพฤติกรรม ทั้งหมดของวงจรสามารถใช้กฎของเกอร์ชอฟฟ์นำมาเขียนเป็นสมการแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้ ที่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L

$$V_{L} = V_{S} - V_{O} \tag{7}$$

เนื่องจาก

$$V_{L} = L \frac{di_{L}}{dt}$$
(8)

จากสมการที่ 7 และ 8 จะได้

$$\frac{di_{L}}{dt} = \frac{V_{s} - V_{o}}{L}$$
(9)

ในกรณีที่น้ำกระแส  $dt = DT_s$ 

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L}\right) DT_s \tag{10}$$

3.2 การทำงานช่วงที่ 2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส ( $DT_s < t \le T_s$ )

ช่วงสภาวะนี้ที่สวิตช์จะไม่ทำงานหรือเปิดวงจรส่งผลให้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไม่ สามารถไหลผ่านไปยังโหลดได้ในช่วงนี้ไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้า (Forward Bias) ทำให้ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ไหลต่อไปยังโหลดอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ *i*<sub>L</sub> ลดลงเป็นเชิงเส้น จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์สามารถเขียนเป็นสมการแรงคันไฟฟ้าได้ดังนี้

แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L

$$V_{L} = -V_{O} \tag{11}$$

จากสมการที่ 8 และ 11 จะได้

$$\frac{di_{L}}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = \frac{-V_{O}}{L}$$
(12)

ในกรณีที่หยุดนำกระแส  $dt = (1 - DT_s)T_s$ 

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T_s \tag{13}$$

#### 3.3 การหาอัตราการลดทอนแรงคันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ลักษณะการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ที่สภาวะคงตัวนั้น การเปลี่ยนแปลงของ กระแสที่ใหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์ทำงานจะทำให้กระแสมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น เท่ากับการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ใหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะสวิตช์ไม่นำกระแส ซึ่งแสดงให้ เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแส i<sub>L</sub> ในหนึ่งคาบเวลาการสวิตช์ค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถหา อัตราการขยายของแรงดันของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \tag{14}$$

จากสมการที่ 10 และ 13 จะได้

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right) DT_s - \left(\frac{V_o}{L}\right) (1 - D)T_s = 0$$
<sup>(15)</sup>

ดังนั้น

$$D = \frac{V_o}{V_s} \tag{16}$$

จากสมการที่ 16 จะเห็นว่าค่าของแรงคันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟตรง แบบ บัคคอนเวอร์เตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าแรงคันอินพุตและค่าวัฎจักรการทำงาน (Duty Cycle) โดย แรงคันเอาต์พุตของวงจรจะมีค่าน้อยกว่าแรงคันทางด้านอินพุตเสมอ

## 3.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์

การหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในโหมด กระแสต่อเนื่องนั้น โดยจะเริ่มจากหาค่ากระแสเฉลี่ยที่ใหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแส เฉลี่ยที่ใหลผ่านโหลด เนื่องจากในสภาวะการทำงานคงตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมี ก่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นจะได้

$$I_{L} = I_{o} = \frac{V_{o}}{R}$$
(17)

สามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีก่าสูงสุดและต่ำสุดดังภาพที่ 24 (ข) จาก สมการในช่วงการทำงานที่สวิตช์ไม่นำกระแส

ด้านกระแสสูงสุดเอาต์พุต

$$I_{L,\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \tag{18}$$

แทนค่าสมการในช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส

$$\Delta i_{L} = \left[\frac{V_{o}}{L}(1-D)T_{s}\right]$$
(19)

$$I_{L,\max} = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[ \frac{V_o}{L} (1-D) T_s \right]$$
(20)

จัดรูปใหม่จะได้

$$I_{L,\max} = V_o \left[ \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$
(21)

ด้านกระแสต่ำสุดเอาต์พุต

$$I_{L,\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \tag{22}$$

แทนสมการที่ 17 และ 19 ในสมการที่ 22 จะได้

$$I_{L,\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[ \frac{V_o}{L} (1-D) T_s \right]$$
(23)

$$I_{L,\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left[ \frac{(1-D)T}{L} \right]$$
(24)

$$I_{L,\min} = V_o \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$
(25)

โดยที่ f = ความถี่ในการสิวตช์

การทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แบบต่อเนื่องนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นกระแสบวกเสมอโดยในสมการที่ 25 สามารถนำมาใช้ในการหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดในขณะที่วงจรยังสามารถทำงานได้ในโหมด กระแสต่อเนื่องได้ดังสมการที่ 26

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f}$$
(26)

3.5 การหาค่าตัวเก็บประจุสำหรับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

การรักษาระดับแรงคันทางด้านเอาพุตให้มีก่ากงที่และลดระดับการกระเพื่อมของ แรงดันให้มีก่าต่ำสุดมีกวามจำเป็นมากที่จะต้องใช้ตัวเก็บประจุซึ่งสามารถกำนวณหาก่าตัวเก็บประจุ ที่มีกวามเหมาะสมโดยหาได้จากกวามสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสดังภาพที่ 25 แล้วนำมาหา ก่าตัวเก็บประจุดังนี้

ที่สมการค่าการประจุ

$$Q = CV_o \tag{27}$$

จัคสมการที่ 27 ให้อยู่ในรูปสมการการเปลี่ยนแปลงของประจุ

$$\Delta Q = C \Delta V_{Q} \tag{28}$$

และสามารถหาค่าแรงคันกระเพื่อมค้านเอาต์พุตได้จากสมการที่ 29

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \tag{29}$$



ภาพที่ 25 รูปคลื่นการวิเคราะห์ค่าตัวเก็บประจุ (ก) กระแสของตัวเก็บประจุ (ข) ระลอกคลื่นแรงคันตกคร่อมตัวเก็บประจุ สามารถหาก่า  $\Delta Q$  ได้จากพื้นในภาพที่ 24 (ก)

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left( \frac{T}{2} \right) \left( \frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8}$$
(30)

แทนค่าสมการที่ 30 ในสมการที่ 29

$$\Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C} \tag{31}$$

เมื่อแทนก่า $\Delta i_{_L}$ ลงในสมการที่ 31 จะได้สมการในการหาก่าตัวเก็บประจุกือ

$$\Delta V_{o} = \frac{T}{8C} \frac{V_{o}}{L} (1-D)T = \frac{V_{o}(1-D)}{8LCf^{2}}$$
(32)

เมื่อพิจารณาขอบเขตของวงจรบักกอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องเพื่อใช้ เถียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว สามารถกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของวงจรได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

รายละเอียด	ค่าที่กำหนด
แรงคันอินพุต	80 โวลต์
แรงดันเอาต์พุต	60 - 30 โวลต์
กระแสเอาต์พุต	15 แอมป์
ความถี่การสวิตช์	20 กิโลเฮิร์ต
ค่าความเหนี่ยวนำ	15 ใมโครเฮนรี่
ค่าตัวเก็บประจุ	4,200 ใมโครฟารัค

จากข้อกำหนดที่ได้จากตารางที่ 1 สามารถเลือกขนาดของอุปกรณ์สวิตช์และไดโอดใน ส่วนของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ได้ดังนี้คือ อุปกรณ์สำหรับสวิตช์เลือกใช้ไอจีบีทีเบอร์ GT60M303 ขนาด 900 โวลต์ 60 แอมป์และใช้ไดโอดแบบฟื้นตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) เบอร์ RHRG30120 ขนาด 1200 โวลต์ 30 แอมป์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบที่จำหน่ายในประเทศไทยจะขนาด กระแสสูงและแรงดันสูงจากอุปกรณ์ดังกล่าวนำมาสร้างเป็นวงจรต้นแบบดังภาพที่ 26



## ภาพที่ 26 วงจรต้นแบบบักคอนเวอร์เตอร์

### 4. อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage Transducer)

การตรวจวัดแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันพลังงานแบบบัคคอนเวอร์เตอร์สำหรับใช้ ในการควบคุมจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันจากบริษัท LEM รุ่น LV25-P ดังภาพที่ 27 สามารถวัด สัญญาณแรงดันได้สูงสุด 500 โวลต์ โดยจะใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Hall Effect) การ ต่อใช้งานแสดงดังภาพที่ 28 ปริมาณของแรงดันที่ได้จะผ่าน R1 เพื่อจำกัดกระแสที่ไหลผ่านวงจร ด้านปฐมภูมิซึ่งควรมีค่าประมาณ 10 มิลลิแอมป์และเพื่อความแม่นยำในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า อัตราส่วนของกระแสด้านทุติยภูมิจะเท่ากับ 2.5 เท่าของกระแสด้านปฐมภูมิ



ภาพที่ 27 รูปถ่ายของ LEM LV25-P



ภาพที่ 28 ลักษณะการต่อใช้งาน LEM LV25-P

สำหรับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ออกมานี้ยังไม่สามารถนำมาใช้สำหรับป้อนให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้จำเป็นต้องผ่านวงจรแปลงกระแสเป็นแรงคันเพื่อให้สามารถนำมาใช้ใน การมาแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อนำมาประมวลผลได้ จากนั้นจะนำมาผ่าน วงจรยกระคับสัญญาณแรงคันเพื่อไม่ให้สัญญาณแรงคันที่ป้อนให้กับคอนโทรลเลอร์นั้นเป็น สัญญาณแรงคันด้านลบ และขั้นตอนสุดท้ายจะนำมาผ่านวงจรขยายออปแอมป์แบบกลับเฟสดังภาพ ที่ 29 เพื่อขยายแรงคันแบบกลับเฟสก่อนส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล ซึ่งแรงคัน ที่เหมาะสำหรับประมวลผลจะอยู่ในย่าน 0 - 5 โวลต์



ภาพที่ 29 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงคันและวงจรยกระคับแรงคัน

### 5. อุปกรณ์ตรวจจับกระแสเอาต์พุต (Current Transducers)

ตัวตรวจจับกระแสที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้านี้ใช้ของบริษัท Allegro คัง ภาพที่ 30 อยู่ในรุ่นตระกูล ACS75x ซึ่งเป็นแบบ Hall Effect ใช้หลักการเหนี่ยวนำของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการแยกส่วนของกระแสที่ใช้ในการตรวจจับ มีย่านวัคที่สามารถวัคขนาค ของกระแสได้ตั้งแต่ -50 แอมป์ถึง 50 แอมป์ มีแบนวิคอยู่ที่ 35 กิโลเฮิร์ต ใช้แหล่งจ่ายขนาค 5 โวลต์







ภาพที่ 30 อุปกรณ์ตรวจจับกระแส (ก) รูปลักษณะของตัวตรวจจับกระแสจากบริษัท Allegro (ข) โครงสร้างภายในของตัวตรวจจับกระแสของบริษัท Allegro รุ่น ACS75X

ปริมาณกระแสที่วัดได้จากตัวตรวจจับกระแสจะสร้างเป็นสัญญาณแรงคันออกมาซึ่งมีข้อดี ตรงที่ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรแปลงกระแสเป็นแรงคันเพิ่มเติมก่อนนำมาใช้งาน เพียงแต่จำเป็นต้องใช้ วงจรสำหรับยกระดับสัญญาณแรงคันให้อยู่ในย่านการวัดที่พอเหมาะสำหรับจ่ายสัญญาณไปยัง ใมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งโดยปกติขณะที่กระแสมีก่าเท่ากับ 0 แอมป์ แรงคันที่ตัววัดกระแสสร้าง ออกมาจะอยู่ในค่าประมาณ 2.5 โวลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรยกระดับแรงดันดังภาพที่ 31 เพื่อให้กระแสที่ 0 แอมป์มีระดับแรงดันเท่ากับ 0 โวลต์ เพื่อให้การนำไปประมวลผลยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นเป็นไปได้อย่างถูกต้อง



### ภาพที่ 31 วงจรปรับระดับสัญญาณ

#### 6. วงจรขับเกต (Gate Driver)

วงจรขับไอจีบีทีสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ไอซีเบอร์ TLP250 ดังภาพที่ 32 ซึ่งเป็นชนิดโฟ-โตกัปเปิล (Photo Coupler) โดยมีคุณสมบัติที่มีการแยกส่วนระหว่างสัญญาณขับที่มาจาก ไมโกรกอนโทรลเลอร์กับส่วนที่ใช้ขับสวิตช์ของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า เพื่อป้องกันไม่ให้ เกิดการรบกวนกันทางด้านกระแสและแรงดัน สามารถทำงานที่ความถี่สูงสุด 25 กิโลเฮิร์ต ในส่วน ของสัญญาณขับจะถูกส่งมาจากโมดูล PWM ที่ได้จากไมโกรกอนโทรลเลอร์โดยมีขนาด 0 – 5 โวลต์ส่งไปยัง LED ที่อยู่ในตัวไอซี TLP250 ให้ทำงานโดยจะมีตัวความด้านทานจำกัดกระแสไหล เข้า LED ไม่ให้เกิน 10 มิลลิแอมป์ สัญญาณทางแสงที่ได้จะไปสั่งให้ทรานซิสเตอร์ที่อยู่ทางด้าน เอาท์พุตของวงจรนำกระแสซึ่งต่อในระดับ Push – Pull เพื่อกำหนดช่วงเวลาการทำงานของไอจีบีที โดยจะมีการต่อวงจรเพิ่มเติมคือไดโอดซีนเนอร์ (Zener Diode) ด้านขาเข้าอิมิเตอร์ของไอจีบีทีเพื่อ สร้างแรงดัน -3 โวลต์ซึ่งจะช่วยให้ช่วงเวลาที่หยุดนำกระแสเร็วยิ่งขึ้น สำหรับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่ ใช้ต่อกับไอซีขับเกตจะใช้แรงดัน 15 โวลต์ทำให้แหล่งจ่ายไฟเพื่อใช้สำหรับขับเกตมีแรงดันไฟฟ้า อยู่ในช่วง -3 โวลต์ถึง 12 โวลต์



ภาพที่ 32 วงจรขับนำเกต TLP 250 และการต่อใช้งาน

#### 7. จอแสดงผลผลึกเหลว (LCD - Liquid Crystal Display)

จอแสดงผลแบบผลึกเหลวในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับบอกค่าต่างๆ เพื่อแสดงสถานะของวงจร เลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงเช่น แรงคันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ค่าวัฏจักรการ ทำงาน (Duty Cycle) และอัตราการไหลของเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งจะใช้จอผลึกเหลวที่ใช้มีขนาค 16 ตัวอักษร 4 บรรทัด ดังภาพที่ 33 การต่อใช้งานจะเชื่อมต่อโดยตรงเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อ รับและส่งข้อมูลบนผ่านสายสัญญาณข้อมูลขนาค 4 บิตทางพอร์ต D (D4-D7) และควบคุมการ ทำงานของจอผลึกเหลวบนสายสัญญาณขนาค 3 บิตคือ RS, R/W, E ทางพอร์ต D (D0-D2) ภาพรวมของการต่อวงจรใช้งานจะแสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 33 LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 4 บรรทัด



ภาพที่ 34 การต่อใช้งานจอแสดงผล LCD

#### 8. ใมโครคอนโทรลเลอร์

ใมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อควบคุมกระบวนการทั้งหมดของวงจร เลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้ตระกูล PIC (Peripheral Interface Controller) เบอร์ 16F877 ของบริษัท ไมโครชิป (Microship) ดังภาพที่ 35 และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2



ภาพที่ 35 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877

รายละเอียด	คุณสมบัติ
ลักษณะซิพียู	RISC
จำนวนคำสั่ง	35 คำสั่ง
ความถี่สูงสุดที่ใช้งาน	20 MHz
แรงคันใฟเลี้ยงในวงจร	2 - 5.5 โวลต์
กระแสซิงค์และกระแสซอร์สของพอร์ต	25 mA
หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช	8 กิโลเวิร์ค
หน่วยความจำแบบแรม	368 ไบต์
หน่วยความจำแบบอีอีพรอม	256 ใบต์
ไทเมอร์ 0	8 บิต
ไทเมอร์ 1	16 บิต
ไทเมอร์ 2	8 บิต
กระบวนการแก้ไขโปรแกรม	ICD (In Circuit Debugger)
วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นคิจิตอล	10 บิต 8 ช่องสัญญาณ
ตัวสร้างสัญญาณ PWM	10 บิต 2 ช่องสัญญาณ
วงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรม	SPI และบัส I2C
วงจรสื่อสารข้อมูลอนุกรม	USART

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

โปรแกรมที่ใช้เขียนเพื่อควบคุมให้คอนโทรลเลอร์ทำงานจะเขียนขึ้นด้วยภาษาซีและใช้ตัว คอมไพเลอร์ CCS แปลงเป็นรหัสเลขฐานสิบหกก่อนจะโปรแกรมลงไปในตัวไมโครคอนโทรล-เลอร์ซึ่งจะต้องผ่านโปรแกรมหลักคือ MPLAB เวอร์ชั่น 8.10 ดังภาพที่ 36 และใช้ตัวโปรกรม ICD2 ของ Microchip เพื่อใช้เขียนโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ดังภาพที่ 37 โดยเชื่อมต่อกับ คอมพิวเตอร์ทางพอร์ต USB ที่มีความรวดเร็วในการโปรแกรม, ตรวจสอบ, ลบข้อมูล นอกจากนี้ยัง เป็นตัวอุปกรณ์สำคัญเพื่อใช้ในการแก้โปรแกรมเพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม โดย สามารถทำงานทีละบรรทัดหรือทำงานจนถึงจุดที่ต้องการให้หยุดการทำงานของโปรแกรมได้เช่น Break point, Step Run, Step Intro, Step Over เป็นต้น และยังสามารถบอกถึงสถานะการทำงานว่า อยู่ส่วนใดของโปรแกรม เช่น โปรแกรมหลักหรือโปรแกรมย่อย เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถดูการ เปลี่ยนแปลงของแอคเครส สถานะของสัญญาณหรือรีจิสเตอร์ต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้การเขียนโปรแกรมมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 36 โปรแกรม MPLAB เวอร์ชั่น 8.10



ภาพที่ 37 ตัวโปรแกรม ICD2 ของ Microchip

## 9. วงจรควบคุมโหลดกำลังสูงแบบปรับค่าได้

ในส่วนของวงจรนี้มีไว้เพื่อสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงของ กระแสไฟฟ้าภายในวงจรแปลงผันพลังงานแบบบัคคอนเวอร์เตอร์ สำหรับภาระทางไฟฟ้าใน งานวิจัยนี้จะใช้โหลดที่มีค่ากำลังวัตต์สูงซึ่ง มีทั้งแบบปรับค่าความต้านทานได้ภายในตัวและแบบค่า ความต้านทานคงที่ดังภาพที่ 38 ในการทดสอบการสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าจะใช้รีเลย์กำลังขนาด 30 แอมป์เป็นตัวสวิตช์เพื่อกำหนดการเพิ่มหรือลดค่าความต้านทาน ลักษณะการต่อวงจรจะแสดงดัง ภาพที่ 39 นอกจากนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมการสวิตช์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งสามารถทำให้ วงจรการสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าสามารถสั่งให้สวิตช์เปิดและปิดได้ทั้งแบบการกดปุ่มและแบบ อัตโนมัติ ดังแสดงดังภาพที่ 40



(ก)



(ข)

# ภาพที่ 38 ตัวความด้านทานวัตต์สูง (ก) แบบปรับค่าความด้านทานได้ (ข) แบบค่าความด้านทานคงที่


ภาพที่ 39 ลักษณะการต่อวงจรสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้า



ภาพที่ 40 วงจรสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าทั้งหมดที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

โดยลักษณะการทำงานของวงจรสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าจะมีก่าความด้านทานแบบคงที่ ก่าสูงก่าหนึ่งเพื่อให้มีกระแสต่ำโดยในวงจรจะใช้ขนาด 500 โอห์มขนาด 500 วัตต์เป็นการแสดงก่า การทำงานช่วงเริ่มต้นทางวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและก่าความต้านทานแบบปรับ ก่า 2 ตัวจะใช้สำหรับสับเปลี่ยนก่าความต้านทานซึ่งแต่ละตัวสามารถปรับก่าได้ตั้งแต่ 0 – 100 โอห์มมีขนาด 400 วัตต์ ดังนั้นในการทดลองสามารถกำหนดก่ากวามต้านทานได้ 2 ก่าต่อการ ทดลอง 1 ครั้งโดยใช้สวิตช์ S1 และสวิตช์ S2

## 10. การประมาณข้อมูลด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

รูปแบบข้อมูลที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นส่วนสำคัญที่จะนำมาใช้เพื่อกำหนดค่าสำหรับ การควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานแบบบัคคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์ เชื้อเพลิงได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Methods) สำหรับการหา คำตอบ โดยการประมาณ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยจะใช้รูปแบบของสมการเส้นตรงและ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Squares) เพื่อประมาณค่าของข้อมูลซึ่งปรากฏอยู่ใน สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยอาศัยหลักที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นจะดีที่สุดนั้น ผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าที่ประมาณได้จากความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น กับค่า สังเกตทุก ๆ ค่า มีค่าน้อยที่สุด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากค่าข้อมูลจริงให้น้อย ที่สุด

จากรูปแบบของสมการเส้นตรงที่ใช้ในการคำนวณกือ y= a + bx ซึ่งจะแสดง กวามสัมพันธ์ของสมการดังภาพที่ 41 โดยที่สมการเส้นตรงนั้นจะผ่านชุดของข้อมูลค่า (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>) ทุกๆ ค่า เมื่อทำการแทนค่า x ไปในสมการเส้นตรงจะได้ค่า y ที่ใกล้เคียงกับชุดข้อมมูลนั้นๆ



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงกับข้อมูล

ดังนั้นการจะหาค่าสมการเส้นตรงผ่านชุดข้อมูล  $(x_i, y_i)$  ที่ใกล้เคียงที่สุดนั้นต้องทำการหา ค่า a และ b แทนลงในสมการเส้นตรง โดยจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งในแต่ละชุดของข้อมูล  $(x_i, y_i)$  จะมีค่าความคลาดเคลื่อนคือ  $e_i = (y_i - \overline{y})$  ดังนั้นเพื่อบอกถึงก่าความถูกของสมการ เส้นตรงที่ได้สร้างขึ้นจะนำเอาค่า  $e_i$  มายกกำลังสองและบวกรวมกันซึ่งจะเรียกค่านี้ว่า SSE (Sum of squares of error) หรือผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนให้มีค่าน้อยที่สุด โดยจะเขียนได้ดัง สมการที่ 33

SSE = 
$$\sum_{i=1}^{n} e_{i}^{2} = \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y}) = \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - a - bx_{i})$$
 (33)

จากสมการที่ 33 สามารถทำให้ค่า SSE มีค่าน้อยที่สุดได้โดยการหาค่า a และ b ซึ่งจะได้มา จากเงื่อนไขของสมการที่ 34 และ 35

$$\frac{\partial SSE}{\partial a} = 0 \tag{34}$$

$$\frac{\partial SSE}{\partial b} = 0 \tag{35}$$

จากสมการที่ 34 และ 35 นำมาแทนค่าด้วยสมการเส้นตรง y = a + bx ซึ่งจะได้เป็นสมการ ที่ 36 และ 37

$$\frac{\partial SSE}{\partial a} = 2\sum_{i=1}^{n} \left( y_i - a - bx \right) = 0$$
(36)

$$\frac{\partial \text{SSE}}{\partial b} = 2\sum_{i=1}^{n} \left[ \left( y_i - a - bx \right) x \right] = 0$$
(37)

จากสมการที่ 36 และ 37 จัคให้อยู่สมการที่ 38 และ 39

$$\sum_{i=1}^{n} y_{i} = a \sum_{i=1}^{n} 1 + b \sum_{i=1}^{n} x_{i}$$
(38)

$$\sum_{i=1}^{n} x_{i} y_{i} = a \sum_{i=1}^{n} x_{i} + b \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2}$$
(39)

จะได้เป็นสมการที่สมบูรณ์ในการหาค่า a และ b ที่ทำให้ค่า SSE น้อยที่สุด ดังสมการที่ 40 และ 41

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_{i} - b \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_{i} \right)$$
(40)

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right) \left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)}{n \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}$$
(41)

จากสมการเส้นตรงที่ได้โดยการประมาณก่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดทำให้ก่าของชุด ข้อมูลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น สามารถนำมาใช้ในการประมาณก่าข้อมูลที่เป็นลักษณะเชิงเส้นได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำมาใช้ประมาณก่าข้อมูลที่ได้จากฐานข้อมูลที่มีลักษณะเป็นกราฟดังภาพที่ 42 โดยจะนำมาประมาณข้อมูลในช่วงที่สำคัญโดยมีทั้งหมด 3 ช่วงดังภาพที่ 43 ซึ่งจะแบ่งเป็นลักษณะ ช่วงของบริเวณกวามสูญเสียภายในต่างๆ ของตัวเซลล์เชื้อเพลิงเองได้แก่ ช่วงกวามสูญเสียการ กระตุ้น ช่วงกวามสูญเสียจากกวามต้านทานภายในและช่วงกวามสูญเสียจากกวามหนาแน่นของ เซลล์เชื้อเพลิง ทั้งนี้ก็จะนำมากิครวมไปถึงอัตราแรงคันที่มีอัตราเชื้อเพลิงต่างๆกันเช่น 25 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ 75 เปอร์เซ็นต์และ100 เปอร์เซนต์



# ภาพที่ 42 ฐานข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิง

Source: Famouri and Gemmen (2003)



# ภาพที่ 43 ลักษณะการกำหนดข้อมูลตามลักษณะค่าความสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิงที่ นำเสนอในงานวิจัยนี้

วิธีการประมาณข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มจากการเก็บค่าช่วงของระดับแรงดันและ กระแสในช่วงความสูญเสียต่างๆ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประมาณค่าเพื่อสร้างเป็นสมการเส้นตรงด้วย วิธีที่ได้กล่าวแล้วเบื้องต้น ดังนั้นเพื่อให้ได้การประมาณค่าของข้อมูลที่ถูกต้องที่สุดจะแบ่งเป็น สมการเส้นตรงทั้งหมด 3 ช่วงด้วยกันตามลักษณะค่าความสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะทำการ กำหนดข้อมูลที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์ สามารถพิจารณาช่วงของข้อมูลดังนี้คือ - แรงดันช่วงการสูญเสียการกระตุ้น โดยค่าของความชั้นของข้อมูลจะมีค่าที่สูงขนาดของ
 แรงดันเริ่มต้นคือ 60 โวลต์ที่กระแส 0 แอมป์จนถึงขอบเขตของข้อมูลที่แรงดันประมาณ 50 โวลต์ที่
 กระแส 5 แอมป์ ซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับช่วงความสูญเสียการกระตุ้นของเชื้อเพลิง

 แรงดันช่วงการสูญเสียจากความต้านทานภายใน สามารถสังเกตุค่าของข้อมูลได้ว่าเป็น ช่วงที่มีค่าของระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงน้อยตามค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 43 ดังนั้นค่าของ ข้อมูลจะเริ่มต้นจากช่วงความสูญเสียการกระตุ้นคือ 50 โวลต์ที่กระแส 5 แอมป์ ส่วนจุดสิ้นสุดของ ข้อมูลจะอยู่ที่แรงดันประมาณ 44 โวลต์ที่กระแส 11 แอมป์ ลักษณะของข้อมูลจะเป็นไปตาม ลักษณะของก่าความสูญเสียจากความต้านทานภายใน

- แรงดันช่วงการสูญเสียจากความหนาแน่นของเซลล์เชื้อเพลิงการกระตุ้น โดยจะเป็นช่วงที่ ค่าของแรงดันลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีค่ากระแสที่สูงค่าของข้อมูลจะเริ่มต้นที่แรงดัน 44 โวลต์ที่ กระแส 11 แอมป์จนถึงค่าแรงดัน 30 โวลต์ที่กระแส 12 แอมป์โดยประมาณ

จากการพิจารณาข้อมูลดังกล่าวจะใด้ค่าของสมการเส้นตรงทั้งหมด 3 สมการโดยในแต่ละ สมการก็จะมีค่า a และ b แตกต่างกันออกไปตามลักษณะข้อมูลที่ทำการประมาณเพื่อให้มีค่าความ กลาดเกลื่อนน้อยที่สุด การพิจารณาข้อมูลเพื่อสร้างสมการเส้นตรงจะทำกับข้อมูลที่อัตราการไหล ของเชื้อเพลิงที่ 50, 75, 100 ปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะใช้รูปเดียวกันกับวิธีการประมาณข้อมูลด้วยสมการ เส้นตรงที่อัตราการไหลของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะของข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงที่ อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์เมื่อทำการกำหนดเป็นรูปแบบของสมการ เส้นตรงแล้วแสดงดังภาพที่ 44 ถึง 47 ตามลำดับ



ภาพที่ 44 กราฟแสดงสมการในแต่ละช่วงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 45 กราฟแสดงสมการในแต่ละช่วงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์

โดยที่ A = แรงดันช่วงการสูญเสียการกระตุ้น B = แรงดันช่วงการสูญเสียจากความต้านทานภายใน C = แรงดันช่วงการสูญเสียจากความหนาแน่นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 46 กราฟแสดงสมการในแต่ละช่วงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 47 กราฟแสดงสมการในแต่ละช่วงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์

จากกราฟความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงที่ผ่านชุดข้อมูลนั้นมีความผิดพลาดที่น้อยมาก เมื่อใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งจะมีประโยชน์ในการนำเอาสมการเส้นตรงที่ได้มาเขียนโปรแกรม เพื่อควบคุมให้วงจรแปลงผันพลังงานแบบบัคคอนเวอร์เตอร์สามารถเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์ เชื้อเพลิงได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

# 11. การออกแบบโปรแกรม

การออกแบบโปรแกรมจะเป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ติดต่อกับ อุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ ดังภาพที่ 48 ให้สามารถควบคุมทำงานได้อย่างถูกต้องซึ่งถือได้ว่าเป็นส่วนที่ สำคัญที่สุดโดยการควบคุมจะอาศัยการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งใน งานวิจัยนี้จะใช้ภาษาซีซึ่งเป็นภาษาระดับสูงในการเขียนโปรแกรมทำให้ลดขั้นตอนการเขียน โปรแกรมที่ซับซ้อนลงได้ โดยโครงสร้างของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 49



ไมโครคอนโทรลเลอร์

แหล่งจ่ายที่ใช้ในวงจรทั้งหมด

ภาพที่ 48 ชุดควบคุมสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง



ภาพที่ 49 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม

้ในการทำงานขั้นตอนแรกของโปรแกรม คือทำการกำหนดก่าเพื่อเถือกโหมดการทำงานที่ อัตราของการ ใหลของเชื้อเพลิงต่างๆ ซึ่งมีอยู่ 4 ระดับคือ 25, 50, 75, 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น ้งากนั้นจะรับค่าของสัญญาณแรงคันและกระแสที่อ่านมาจากเซนเซอร์เพื่อทำการแปลงสัญญาณ ้ข้อมูลอะนาลอกที่ได้เป็นสัญญาณดิจิตอลส่งให้กับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำการประมวลผล ้งากนั้นจะส่งข้อมูลมาทำการตัดสินใจเพื่อเลือกว่าก่าของกระแสที่วัดได้มีก่าน้อยกว่าที่กำหนดไว้ หรือไม่ ซึ่งถ้าน้อยกว่าจะเลือกการคำนวณสมการเส้นตรงค้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในช่วงความ ิสูญเสียจากการกระตุ้น (Activation loss) แต่ถ้ามากกว่าค่ากระแสที่ได้ระบุไว้ก็จะส่งไปตัคสินใจเพื่อ ้เลือกการประมวลผลในช่วงค่าความสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจะเหลือ 2 ช่วงคือช่วงความ ้สูญเสียจากความต้านทานภายในและความสูญเสียจากความหนาแน่นของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะ ้เลือกข้อมูลทั้ง 2 ช่วงนี้จากค่ากระแสที่วัดได้ว่ามากว่าหรือน้อยกว่าที่ระบุไว้หรือไม่ ซึ่งก็จะเข้าสู่ หลักการคำนวณสมการเส้นตรงและประมาณก่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเดิม เมื่อได้ก่าที่ ้ คำนวณเสร็จแล้วค่าที่ได้จากการประมาณทุกๆค่าจะส่งไปยังส่วนของตัวกำหนดวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ PWM สำหรับใช้ขับสวิตช์ในวงจรแปลงผันพลังงานแบบบัค ้คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำให้ระดับแรงดันนั้นแปรเปลี่ยนตามค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ ทำให้มี ้ลักษณะเหมือนกับพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อการทำงานของโปรแกรมครบรอบการทำงานก็ ้จะส่งไปยังตัวบอกก่าสถานะเช่น แรงคันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าออกทางจอแสคงผล แบบจอผลึก นอกจากนี้สัญญาณกระแสและแรงคันของวงจรแปลงผันพลังงานแบบบัคคอนเวอร์ เตอร์จะส่งกลับไปในส่วนของตัวอ่านค่ากระแสและแรงดันเพื่อส่งไปดำเนินการประมวลผลต่อไป

## 12. การจำลองวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และการควบคุม

การจำลองพฤติกรรมของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้เพื่อทำให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะทำให้สามารถเข้าใจการทำงานของ วงจรได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งทำให้ง่ายสำหรับนำมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม Matlab เวอร์ชั่น 7 โดยจะใช้ Simulink เพื่อจำลองการทำงานของวงจรบัคคอน เวอร์-เตอร์แบบเวลาจริงได้ ซึ่งจะแสดงส่วนต่างๆ ที่จะพิจารณาในการออกแบบดังนี้

พิจารณาการหาแบบจำลองทางค้านของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LC Filter) คังภาพที่ 50 จะวิเคราะห์ทางค้านกระแสและแรงคันรวมทั้งค้านอินพุตเอาต์พุตรวมไปถึงค่าความต้านทานแฝง ภายในของอุปกรณ์ประกอบค้วย ค่าความต้านทานภายแฝง R, ในตัวเหนี่ยวนำและค่าความความ ด้านทานภายแฝง R<sub>c</sub> ในของตัวเก็บประจุ ซึ่งจะได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบาย ความสัมพัธ์ของวงจรดังนี้



ภาพที่ 50 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

$$L\frac{di_{L}}{dt} = V_{S} - V_{O} - i_{L} \cdot R_{L}$$

$$\tag{42}$$

$$C\frac{dV_c}{dt} = i_L - i_o \tag{43}$$

$$V_o = V_c - R_c \left( i_L - i_o \right) \tag{44}$$

จากสมการที่ 42 ถึง 44 สามารถสร้างแบบจำลอง Matlab Simulink โดยใช้สมการของวงจร กรองความถี่ต่ำผ่าน ได้ดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 แบบจำลอง Matlab Simulink ของวงจรกรองความลี่ต่ำผ่าน

Ì

จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้นำมาสร้างเป็นแบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ด้วย Matlab Simulink ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้แรงคันทางด้านเอาท์พุตแปรเปลี่ยนตามค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) แล้วส่วนถัดมาที่เราจะทำการออกแบบคือ ภาคสัญญาณ PWM เพื่อกำหนดค่าเปิดและ ปิดการส่งจ่ายแรงคันไฟตรงไปยังวงจรกรองกวามถี่ต่ำผ่าน โดยจะใช้บล็อกสร้างสัญญาณ สามเหลี่ยมมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงและผ่านตัวตรวจจับสัญญาณที่ศูนย์เพื่อสร้างเป็น สัญญาณ PWM ออกมา ดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 แบบจำลอง Matlab Simulink ของสัญญาณ PWM

เมื่อได้แบบจำลอง Matlab Simulink ของวงจรความถี่ต่ำผ่านและภาคสัญญาณ PWM จากนั้นนำทั้งสองส่วนมาต่อทำงานร่วมกันดังภาพที่ 53 เพื่อทคสอบการทำงานของแบบจำลองวงจร แปลงผันพลังงานแบบบัคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งการแสดงผลการทำงานจะใช้บลีอกของสโคปที่มีอยู่ใน โปรแกรม Matlab Simulink เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง จากนั้นจะทำการทคสอบด้วยการปรับก่าวัฏ-จักรการทำงาน (Duty Cycle) ในระดับต่างๆ ซึ่งจะทำให้ก่าแรงดันทางด้านเอาท์พุตของวงจร สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามต้องการ



ภาพที่ 53 แบบจำลอง Matlab Simulink ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

หลังจากที่ได้แบบจำลอง Simulink ของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ที่สมบูรณ์แล้ว เพื่อให้ สามารถกำหนดก่าระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุตให้มีขนาดตามกวามต้องการดังที่ได้กล่าวไว้ จะทำ การปรับก่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) เพื่อแสดงว่าวงจรที่ได้ทำการออกแบบนั้นสามารถ ทำงานได้จริงดังภาพที่ 54 ถึง 56



ภาพที่ 54 ปรับค่าแรงคันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 55 ปรับค่าแรงคันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 56 ปรับค่าแรงคันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 80 เปอร์เซ็นต์

ในขั้นตอนต่อมาจะทำการควบคุมวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถเลียนแบบพฤติกรรม ของเซลล์เชื้อเพลิง ลักษณะการควบคุมจะใช้การคำนวณเชิงเส้นที่ได้จากการประมาณก่าความ ถูกต้องด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อวิธีการประมาณข้อมูลและการ ออกแบบโปรแกรมควบคุม การออกแบบใน Simulink จะใช้ตัวเงื่อนไขและตัดสินใจเพื่อใช้เลือกก่า การกำนวณแบบเชิงเส้นที่ตำแหน่งของก่าความสูญเสียต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงเช่น ความความ สูญเสียการกระตุ้น ก่าความสูญเสียจากความต้านทานภายในและก่าความสูญเสียจากความหนาแน่น ของเชื้อเพลิง เป็นต้น ดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 ตัวเงื่อนไขการตัดสินใจเพื่อเลือกค่าการกำนวณใน Simulink

เมื่อได้แบบจำลองการทำงานใน Matlab Simulink ภาคต่างๆทั้งหมดแล้วนำมาประกอบเข้า ด้วยกันเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 แบบจำลอง Simulink ของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อได้วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงจากแบบจำลอง Simulink แล้ว ทำการ ทคสอบการทำงาน โคยจะทำการเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ระดับต่างๆ เช่น อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำการเปลี่ยนสถานะของโหลดที่ เวลาต่างๆกัน เพื่อให้ค่าของกระแสมีค่าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระดับของแรงดันมีค่าลดลง ซึ่งจะเป็นไป ตามลักษณะฐานข้อมูลของตัวเซลล์เชื้อเพลิง ผลการจำลองในแต่ละการทคลองจะแสดงให้เห็นถึง ก่าความสูญเสียต่างๆเช่น ค่าความสูญเสียจากการกระตุ้น ค่าความสูญเสียจากความต้านทานภายใน และค่าความสูญเสียจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ดังภาพที่ 59 ถึง 62 เรียงลำดับจากอัตราการ ไหลของเชื้อเพลิงจากน้อยไปมากตามลำดับ



ภาพที่ 59 แรงดันและกระแสจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 60 แรงดันและกระแสจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 61 แรงคันและกระแสจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 62 แรงคันและกระแสจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์

ผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบวงเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงด้วย วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบบัคคอนเวอร์เตอร์นั้น เมื่อมีการเปลี่ยนโหลดแต่ละครั้งจะทำให้ ก่ากระแสเพิ่มขึ้นโดยก่าของกระแสนี้จะเป็นตัวสำคัญในการเปลี่ยนแปลงก่าวัฏจักรการทำงานของ วงจรแปลงผันพลังงานให้มีก่าที่ลดลง ส่งผลให้ก่าแรงดันที่เอาท์พุตมีก่าลดลงตามไปด้วยซึ่งทั้ง ก่ากระแสและแรงดันนี้จะผกผันซึ่งกันและกันตามลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ผลการ ทดลองที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ ถึง 100 เปอร์เซนต์ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 63 ถึง 66 ตามลำดับ



ภาพที่ 63 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูล เซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 64 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูล เซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 65 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูล เซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 66 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูล เซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์

จากผลที่ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลแสดงให้เห็นว่า สามารถทำการเลียนแบบพฤติกรรม เซลล์เชื้อเพลิงที่บริเวณความสูญเสียต่างๆ รวมถึงที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ได้ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลจริงของเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับก่ากวามผิดพลาดที่เกิดขึ้น ของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงจะแสดงดังภาพที่ 67 ถึง 70



ภาพที่ 67 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 68 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 69 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 70 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์

จากภาพที่ 67 ถึง 70 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นมากเท่าไหร่จะส่งผลให้ค่า ระดับแรงดันที่ได้กลาดเกลื่อนจากฐานข้อมูลจริง สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการทำงานของวงจรบัก-กอนเวอร์เตอร์ที่กระแสสูงจะมีระดับแรงดันที่ลดลงไม่เป็นไปตามก่าวัฏจักรการทำงานที่ได้ตาม ทฤษฎีซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้เช่น การสูญเสียการสวิตช์ ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ เป็น ต้น สำหรับแนวกวามกิดดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถนำมาสร้างเป็นวงจรต้นแบบได้จริงในทาง ปฏิบัติ

## ผลและวิจารณ์

#### ผล

จากข้อแนวคิดและการจำลองการทำงานในเบื้องด้นสามารถทำการสร้างวงจรเลียนแบบ พฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำ วงจรด้นแบบที่สร้างขึ้นทำการทดสอบที่สภาวะการทำงานต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงเช่น ที่สภาวะ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ สภาวะการสูญเสียจากการกระคุ้น สภาวะการสูญเสียจากความด้านทานภายในและสภาวะการสูญเสียจากความหนาแน่นของเซลล์ เชื้อเพลิงและการตอบสนองทางพลวัดของเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น เพื่อทดสอบการตอบสนองของ ระบบให้ทำงานที่สภาวะการทำงานต่างๆ โดยใช้วิธีการสับเปลี่ยนก่าความด้านทานวัตต์สูงที่ สามารถปรับค่าได้ โดยจะนำเสนอผลการทดสอบทุกๆ สภาวะการทำงานที่กระแสของระบบไม่เกิน 15 แอมป์และทำการวัดรูปคลื่นแรงดันจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อดู สภาวะคงตัวและกระแสกับแรงดันจะวัดจากเซนเซอร์เพื่อดูลักษณะด้านพลวัต สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ วัดคือ ออสซิลโลสโคปของบริษัท Tektronix รุ่น TDS 1012B สำหรับรายละเอียดในการทดสอบจะ แบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

### 1. การทดสอบทางด้านวงจรเรียงกระแสสามเฟส

ในหัวข้อนี้จะทคสอบแหล่งจ่ายไฟตรงสามเฟสแบบเคลต้ำที่ได้มาจากการต่อหม้อแปลง 3 ลูกเพื่อเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นโดยจะทำการวัดด้วยออสซิลโลสโคปที่บริเวณระหว่างสาย เพื่อดูก่าสัญญานไฟสลับ ดังภาพที่ 71 ขั้นตอนต่อมาจะทำการจ่ายไฟสลับผ่านวงจรเรียงกระแส แบบสามเฟสโดยใช้ไคโอควัดรูปกลื่นที่ได้เพื่อดูการกระเพื่อมของสัญญานดังภาพที่ 72 หลังจาก นั้นทำการต่อเข้ากับตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันกระเพื่อมออกไปทำการวัดรูปสัญญานไฟตรงดัง ภาพที่ 73



ภาพที่ 71 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ของแรงคันระหว่างสาย



ภาพที่ 72 แรงคันไฟฟ้าเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสสามเฟส



**ภาพที่ 73** แรงดันไฟฟ้าเมื่อผ่านตัวเก็บประจุ

## 2. การทดสอบวงจรแปลงผันพลังงานแบบบัคคอนเวอร์เตอร์

ทำการต่อแหล่งจ่ายไฟเรียงกระแสแบบสามเฟสเข้ากับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แล้วทำการ ทคสอบการปรับเปลี่ยนค่าแรงคันทางค้านเอาท์พุตของวงจรด้วยการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) ของสวิตช์ไอจีบีทีให้ทำงานที่ระคับต่างๆ แสคงผลการทคลองคังภาพที่ 74 ถึง 77 จากนั้นเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทคลองและผลที่ได้จากการคำนวณแสคงคังภาพที่ 78



ภาพที่ 74 แรงคันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 75 แรงดันเอาต์พุตที่ก่าวัฏจักรการทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 76 แรงดันเอาต์พุตที่ก่าวัฏจักรการทำงาน 80 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 77 แรงคันกระเพื่อมที่แรงคันเอาต์พุต



ภาพที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคันเอาต์พุตกับค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle)

# 3. การทดสอบวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล้เชื้อเพลิง

หลังจากที่ได้ทดลองวงจรภากกำลังทั้งสองส่วนแล้วจะเห็นว่าสามารถทำงานได้ตรงตามที่ ได้ออกแบบไว้ จากนั้นนำมาต่อทำงานร่วมกันเพื่อสร้างเป็นวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์ เชื้อเพลิงต้นแบบและทดลองกับชุดตัวต้านทานวัตต์สูงดังภาพที่ 79 ทำการทดลองที่อัตราแรงดัน เชื้อเพลิงในรูปแบบของข้อมูลดังภาพที่ 43 ถึง 46 ทดลองในสภาวะของโหลดที่แตกต่างกันเพื่อ แสดงสภาวะการทำงานของความสูญเสียภายในของเซลล์เชื้อเพลิงเช่น การสูญเสียการกระตุ้น, การ สูญเสียจากความต้านทานภายในและความสูญเสียจากความหนาแน่นของเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น โดยแต่ละการทดลองจะจำกัดการทดลองที่กระแสไม่เกิน 15 แอมป์ เพื่อความปลอดภัยของตัว แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและผู้ทำการทดลอง รายละเอียดผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้



# ภาพที่ 79 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซล์เชื้อเพลิงต้นแบบ

3.1 การทคสอบอัตราการใหลของเชื้อเพลิงที่ 25 เปอร์เซนต์

ทำการปรับย่านการทำงานของชุดควบคุมของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ให้อยู่ในสถานะการทำงานที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบการทำงานช่วงความ สูญเสียจากการกระตุ้นของเซลล์เชื้อเพลิงโดยทำการปรับที่ชุดค่าความด้านทานวัตต์สูงแบบปรับค่า ทดลองทำการสับเปลี่ยนค่าความต้านทานที่เวลาต่างๆ เพื่อทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำคับ ผล การทดสอบแสดงดังภาพที่ 80



ภาพที่ 80 แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความด้านทาน 20 โอห์มเป็น 10 โอห์ม ที่อัตราการ ใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทคลองดังภาพที่ 80 ช่วงเวลาเริ่มต้นเป็นเสมือนสภาวะที่ไม่มิโหลด แรงดัน เอาต์พุตจะมีก่าอยู่ประมาณ 60 โวลต์ซึ่งจะเป็นแรงดันในทางอุดมกติของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเริ่ม สับเปลี่ยนก่าความด้านทานไปที่ 20 โอห์มโดยประมาณ ซึ่งทำให้กระแสโหลดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ ระดับแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงผันพลังงานแบบบักคอนเวอร์เตอร์จะมีก่าก่อยๆ ลดลง ซึ่งเป็นผล มาจากการกำหนดก่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) ของไอจีบีทีให้ก่อยๆ ลดก่าลงเพื่อเลียนแบบ สภาวะทางพลวัตภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากว่าแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงเองนั้นจะไม่ลดลง อย่างทันทีทันใดเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น แต่จะก่อยๆ ลดก่าระดับแรงดันไฟฟ้าลงจนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งวัดแรงดันไฟฟ้าจากมิเตอร์ได้ประมาณ 54 โวลต์และมีก่ากระแสที่วัดได้จากจอแสดงผลผลึก ประมาณ 2.5 แอมป์ จากนั้นเริ่มทำการเปลี่ยนเป็นก่าความด้านทานประมาณ 10 โอห์ม แรงดันไฟฟ้าของวงจรจะก่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่สภาวะกงตัวที่ระดับแรงดัน 50 โวลต์ที่ก่าของ กระแสไฟฟ้าประมาณ 4.3 แอมป์ จากทั้งสองกรณีจะเป็นการทดสอบให้ทำงานในช่วงความสูญเสีย จากการกระตุ้นซึ่งวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำลองพฤติกรรมดังที่กล่าวได้

ขั้นตอนต่อมาจะทำการทดลองช่วงความสูญเสียจากความด้านทานภายในของเซลล์ เชื้อเพลิง โดยทำการเปลี่ยนค่าความด้านทานในลักษณะต่างๆ กัน โดยมีอยู่ด้วยกันหลายกรณีดังภาพ ที่ 81 ถึง 84



**ภาพที่ 81** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทาน 7.6 โอห์มเป็น 4.7 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์



**ภาพที่ 82** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 6.3 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์



**ภาพที่ 83** แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 5 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 84 แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 3.5 โอห์ม ที่อัตราการใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทคลองคังภาพที่ 81 ถึง 84 ใค้ทำการทคสอบสภาวะความสูญเสียความ ต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง โคยทคลองกับตัวด้านทานวัตต์สูงให้เปลี่ยนค่าความต้านทาน เพื่อทำให้ค่ากระแสเปลี่ยนแปลงที่ระคับต่างๆ เพื่อให้ค่าของแรงคันเอาต์พุตนั้นลคลงตามลักษณะ พฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงโดยจะทดสอบค่ากระแสตั้งแต่ 5 แอมป์ถึง 10.6 แอมป์ ซึ่งอยู่ในช่วง ความสูญเสียจากความด้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองได้แสดงถึงการเกิดทางพลวัตของแรงดันและสภาวะอยู่ตัวของวงจรเลียนแบบ พฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

ขั้นตอนต่อมาจะทำการเลียนแบบพฤติกรรมความสูญจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง โดยจะทำการเลือกค่าโหลดให้มีค่าความต้านทานน้อยลงจากค่าที่ได้ทดลองที่ผ่านมา ซึ่งจากการ คำนวณจะอยู่ในช่วงประมาณ 3 โอห์ม เพื่อให้กระแสระบบมีค่าเพิ่มขึ้นทำการทดลองสับเปลี่ยนค่า ความต้านทาน ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 85



ภาพที่ 85 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น 3 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทคลองคังภาพที่ 85 จะเห็นว่าระคับของช่วงแรงคันที่วัคได้จะมีค่าประมาณ 38 โวลต์ที่กระแส 11 แอมป์ ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะความสูญเสียจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ระคับของแรงคันจะมีค่าที่ลคลงมากกว่าสภาวะความสูญเสียระยะแรกๆ ผลตอบสนองการทำงาน ของระบบนั้นสามารถทำการเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงสภาวะนี้ได้ จากที่ได้ทำการทดลองที่สภาวะความสูญเสียภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงต่างๆ แล้ว สำหรับการทดลองดังต่อไปนี้จะแสดงถึงการตอบสนองของระบบเมื่อมีสภาวะกระแสที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระดับแรงดันมีก่าลดลงซึ่งจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน โดยจะสังเกตก่ากวามเปลี่ยนแปลง จากระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสและตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ผลการทดลองจะ แสดงดังภาพที่ 86



ภาพที่ 86 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงคันขณะสับเปลี่ยนค่าความด้านทาน ที่อัตราการ ใหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทคลองใช้กับค่าความต้านประมาณ 8 โอห์ม วัคค่าของระดับแรงคันไฟฟ้า ได้ประมาณ 48 โวลต์และกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 5.6 แอมป์ซึ่งในภาพที่ 86 ระดับแรงดันของ หน่วยวัคจะมีขนาคเป็นมิลิโวลต์การเปรียบเทียบกระแสกับแรงดันจะใช้สัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ เป็นตัววัคค่าออกมา เนื่องจากสโคปที่ใช้ไม่สามารถวัคค่ากระแสภายในวงจรได้จากการทคลอง พบว่าเมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใคระดับแรงดันจะก่อยๆ ลคลงจนถึงสภาวะคงตัวและเมื่อ กระแสมีค่าลคลงระดับแรงดันจะค่อยๆปรับขึ้นจนถึงสภาวะอยู่ตัว จากผลการทคลองแสดงให้เห็น ว่าวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นสามารถทคสอบได้ทุกสภาวะการ ทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์จะมีลักษณะของสัญญาณรบกวนปนออกมาซึ่ง ในทางปฏิบัติไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เมื่อนำมาประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องผ่าน การกรองสัญญาณอีกชั้นหนึ่งซึ่งเป็นในลักษณะของการโปรแกรม ก่อนที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการ แปลงสัญาณสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล โดยใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average -MA) ซึ่งจะช่วยลดความแตกต่างของสัญญาณทำให้สัญญาณที่ได้มีความนิ่งมากยิ่งขึ้นไม่ เปลี่ยนแปลงขึ้นลง หลักการทำงานของโปรแกรมคือจะเก็บค่าสัญญาณในแต่ละเวลาที่ต่างกัน นำมา รวมกันแล้วหารด้วยจำนวนสัญญาณที่เก็บเข้ามาดังภาพที่ 87



ภาพที่ 87 รูปแบบของค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

ค่าเฉลี่ยที่ใช้ในโปรแกรมสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ 32 ค่าและทำการเฉลี่ยค่าออกมา 1 ค่า อย่างต่อเนื่อง จากการกรองสัญญาณด้วยวิธีนี้ทำให้สัญญาณที่ไม่อยู่ในกลุ่มจะถูกเฉลี่ยออกไปทำให้ สัญญาณที่ต้องการนั้นมีความถูกต้อง ส่งผลให้กระบวนการประมวลผลข้อมูลมีประสิทธิภาพมาก ยิ่งขึ้น 3.2 การทคสอบอัตราการใหลของเชื้อเพลิงที่ 50 เปอร์เซนต์

ทำการปรับย่านการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้อยู่ในสถานะการทำงานที่ อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ทคสอบการทำงานช่วงความสูญเสียจากการกระตุ้นของ เซลล์เชื้อเพลิงโคยทำการปรับค่าความด้านทานวัตต์สูงแบบปรับค่าได้ที่ความด้านทาน 20 โอห์ม และ 10 โอห์มโคยประมาณ ทคลองทำการสับเปลี่ยนโหลดเพื่อทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำคับ เพื่อให้สามารถสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรได้ ผลการทคสอบแสดงคังภาพที่ 88



**ภาพที่ 88** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้า 20 โอห์มเป็น 10 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทคลองคังภาพที่ 88 จะเห็นว่าช่วงการทำงานของสภาวะสูญเสียการกระตุ้น จะมีค่ากระแสตั้งแต่ 0 – 5 แอมป์ ตามที่ได้ทำการควบคุมไว้มีลักษณะคล้ายเช่นเดียวกับผลการ ทคลองที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากค่าตัวแปรของสมการเส้นตรงจะ เหมือนกันตามลักษณะฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิง

ทำการทคลองช่วงความสูญเสียความค้านทานภายใน เลือกค่าความค้านทานให้ เหมาะสมเพื่อใช้ทคสอบ โดยช่วงการทำงานของระบบช่วงนี้จะมีย่านการทำงานที่กว้างมากคือ ตั้งแต่กระแส 5 – 20 แอมป์ แต่ในการทคลองจริงเราจะกำหนดให้มีก่ากระแสเพื่อใช้ทคสอบไม่เกิน
15 แอมป์ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ผลการทดสอบจะแสดงดัง ภาพที่ 89 ถึง 92



ร**ูปที่ 89** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทานเป็น 6.2 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์



ร**ูปที่ 90** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความด้านทาน 6.8 โอห์มเป็น 4 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์



ร**ูปที่ 91** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน 5.2 โอห์มเป็น 2.7 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง50 เปอร์เซ็นต์



ร**ูปที่ 92** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามต้านทานเป็น 2.5 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบสภาวะความสูญเสียจากความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง จะทดสอบ ในช่วงของกระแสตั้งแต่ 5 – 15 แอมป์ จากภาพที่ 89 ถึง 92 แสดงให้เห็นว่าสามารถเลียนแบบ ลักษณะกระแสและแรงคันในช่วงการทำงานนี้ได้ โดยเมื่อทำการสับเปลี่ยนค่าความต้านทานในแต่ ละช่วงจะสังเกตถึงความเปลี่ยนแปลงของแรงคันได้อย่างชัดเจนรวมถึงพลวัตที่เกิดขึ้นซึ่งจะก่อยๆ ลดระดับแรงดันลงมาจนถึงสภาวะคงตัว สำหรับการทดลองทางด้านของความสูญเสียจากความ หนาแน่นของเซลล์เชื้อเพลิงในการทดลองจริงไม่สามารถทำได้เนื่องจากมีก่าของกระแสสูงเกินกว่า ที่แหล่งจ่ายไฟตรงสามารถจ่ายได้ในกรณีนี้จึงไม่ได้ทำการทดสอบ

สำหรับการทดลองในขั้นถัดมาจะทดสอบเพื่อแสดงสถานะความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสกับแรงคันเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยจะทคสอบที่ 6.2 โอห์มและทำการวัดผล ของสัญญาณจากตัวตรวจจับแรงคันและตัวตรวจจับกระแส ซึ่งให้ผลการทำลองคังภาพที่ 93



## ภาพที่ 93 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงคันขณะสับเปลี่ยนค่าความด้านทาน ที่อัตราการ ใหลเชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์

ผลการทคลองภาพที่ 93 เมื่อทำการทคสอบกับตัวด้านทานกระแสจะมีเพิ่มขึ้นจาก 0 – 6.5 แอมป์ส่งผลให้ระดับของแรงคันมีค่าค่อยๆ ลคลงเป็นผลมาจากการเลียนแบบในส่วนของพลวัต จนถึงสภาวะคงตัว หลังจากนั้นจะทำการปลคตัวด้านทานออกเพื่อให้กระแสมีค่าเป็น 0 แอมป์ซึ่งจะ ส่งผลให้ระดับของแรงดันก่อยๆปรับเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะกงตัวในรูปของระดับแรงดันเต็ม จากผล การทดลองแสดงถึงการตอบสนองการทำงานของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

### 3.3 การทคสอบอัตราการใหลของเชื้อเพลิงที่ 75 เปอร์เซนต์

ทำการปรับย่านการทำงานของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ใน สถานะการทำงานที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 75 เปอร์เซ็นต์ ทคสอบการทำงานช่วงความสูญเสีย จากการกระตุ้นของเซลล์เชื้อเพลิงโดยทำการปรับค่าความต้านทานวัตต์สูงแบบปรับค่าได้ที่ความ ต้านทาน 20 โอห์มและ 10 โอห์มโดยประมาณ ทคลองทำการค่าความต้านทานเพื่อทำให้กระแสมี ค่าเพิ่มขึ้นตามลำคับเช่นเดียวกับที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผลการทคสอบ แสดงคังภาพที่ 94



**ภาพที่ 94** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความด้านทาน 20 โอห์มเป็น 10 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทคลองคังภาพที่ 94 วงเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงสามารถ เลียนแบบในสภาวะความสูญเสียการกระตุ้นได้ซึ่งจะอยู่ในช่วงกระแส 0 – 5 แอมป์ ซึ่งยังรักษา ระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงกระแสที่ต้องการได้ ทำการทคลองช่วงสภาวะความสูญเสียจากความด้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงโคย ทคสอบกับตัวด้านทานเพื่อให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นในระดับต่างๆ ผลการทคลองจะแสดงดังภาพที่ 95 ถึง 98



ภาพที่ 95 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความด้านทาน 6.9 โอห์มเป็น 3.5 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



**ภาพที่ 96** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามด้านทานเป็น 5.2 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



**ภาพที่ 97** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามด้านทานเป็น 4.2 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



**ภาพที่ 98** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามด้านทานเป็น 2.5 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทคลองช่วงสภาวะความสูญเสียจากความด้านทานภายใน วงจรต้นแบบนั้น สามารถทำการจำลองได้ โคยมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งกระแสและ แรงดันซึ่งจะจำกัดค่ากระแสในการทดลองไม่เกิน 15 แอมป์ ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงพลวัตและ สภาวะคงตัวเมื่อมีการปรับค่าความต้านทานวัตต์สูงในระดับต่างๆ กัน

ในการทคลองถัคมาจะทำการทคลองในส่วนของผลตอบสนองระหว่างกระแสกับ แรงคันไฟฟ้าโดยการวัคผลของสัญญาณจากตัวตรวจจับแรงคันและตัวตรวจจับกระแส ซึ่งให้ผล การทำลองคังภาพที่ 99



ภาพที่ 99 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงคันขณะสับเปลี่ยนค่าความด้านทาน ที่อัตราการ ใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองที่ได้ดังภาพที่ 99 ทดสอบกับก่ากวามด้านทานที่ 5.2 โอห์มสามารถทำ การวัดก่ากระแสกับแรงดันเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยจะทำการวัดจากตัวตรวจจับสัญญาณระดับก่า แรงดันจะมีขนาดเป็นมิลลิโวลต์ สำหรับก่าจริงที่วัดได้จะมีขนาดแรงดัน 45 โวลต์ที่กระแส 7.7 แอมป์ในผลการทดลองจะแสดงถึงสภาวะที่มีโหลดและไม่มีโหลดเพื่อแสดงผลการตอบสนองการ ทำงานของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง โดยเมื่อมีกระแสเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดระดับ แรงดันเอาต์พุตจะก่อยๆ ปรับลดระดับแรงดันลงจนถึงสภาวะกงตัวและเมื่อสภาวะที่ไม่มีกระแส แรงดันด้านเอาต์พุตจะก่อยๆ ปรับขึ้นจนถึงก่าแรงดันที่ไม่มีการสูญเสีย จากผลการทดสอบแสดงให้ เห็นว่าวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำลองการทำงานได้ทั้งแบบพลวัตและ สภาวะคงตัว

3.4 การทคสอบการใหลของเชื้อเพลิงที่ 100 เปอร์เซนต์

เลือกย่านการทำงานของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในสถานะการ ทำงานที่อัตราการใหลเชื้อเพลิงที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ทคสอบสภาวะการทำงานช่วงความสูญเสียจาก การกระตุ้นของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้ความต้านทานวัตต์สูงแบบปรับค่าที่ความต้านทาน 20 โอห์ม และ 10 โอห์มโดยประมาณ ทคลองทำการสับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบผลการทคสอบ แสดงดังภาพที่ 100



ภาพที่ 100 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความด้านทาน 20 โอห์มเป็น 10 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์

ผลการทคลองคังภาพที่ 100 เมื่อทำการเปลี่ยนโหลดเป็นความด้านทาน 20 โอห์ม ระดับของแรงดันจะลดลงมาประมาณ 54 โวลต์ที่กระแส 2.5 แอมป์จากนั้นทำการเปลี่ยนโหลดที่ กวามด้านทานเป็น 10 โอห์มส่งผลให้ระดับแรงดันลดลงอยู่ที่ระดับแรงดัน 49.5 โวลต์ที่กระแส 4.3 แอมป์ จากผลการทคลองแสดงให้เห็นว่าช่วงการทำงานสภาวะความสูญเสียจากการกระตุ้นวงจร ต้นแบบสามารถเลียนแบบได้ ขั้นตอนต่อมาทำการทดลองช่วงความสูญเสียจากความต้านทานภายในจะทำการ เปลี่ยนโหลดที่ค่าความต้านทานเพื่อให้ก่าของกระแสเปลี่ยนแปลงไปในระดับต่างๆ เพื่อทดสอบ การตอบสนองการทำงานของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงโดยจะทดสอบที่ค่ากระแส ไม่เกิน 15 แอมป์ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 101 ถึง 104



ภาพที่ 101 แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าความด้านทาน 6.5 โอห์มเป็น 3.5 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 102 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามด้านทานเป็น 4 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 103 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนก่ากวามด้านทานเป็น 3 โอห์ม ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์





จากผลการทคลองช่วงความสูญเสียความด้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง สามารถปรับ ระดับแรงดันลงตามก่ากระแสที่เปลี่ยนไปได้ที่ก่าความด้านทานในระดับต่างๆ โดยทคลองที่กระแส ไม่เกิน 15 แอมป์ ผลการทคลองที่ได้สามารถจำลองได้ทั้งแบบพลวัตและสภาวะอยู่ตัว การทคลองขั้นตอนต่อมาจะทำการทคลองในส่วนของผลตอบสนองระหว่างกระแส กับแรงคันไฟฟ้าเช่นเดียวกับที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 25, 50, 75 เปอร์เซ็นต์ โดยการวัดผลของ สัญญาณจากตัวตรวจจับแรงคันและตัวตรวจจับกระแส ซึ่งให้ผลการทำลองคังภาพที่ 105



ภาพที่ 105 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงคันขณะสับเปลี่ยนค่าความด้านทาน ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์

ผลการทคลองคังภาพที่ 105 โหลคที่ใช้ทคสอบมีก่าประมาณ 4 โอห์ม วัคก่าของระดับ แรงคันไฟฟ้าได้ประมาณ 44 โวลต์และกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 9.1 แอมป์ โดยจะวัคระคับแรงคัน ที่มีหน่วยขนาคเป็นมิลลิโวลต์การเปรียบเทียบกระแสกับแรงคันซึ่งใช้สัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ทั้ง กระแสและแรงคัน จากผลการทคสอบระคับกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใคระคับแรงคันจะ ก่อยๆ ลคลงจนถึงสภาวะอยู่ตัวและเมื่อกระแสมีก่าลคลงระคับแรงคันจะก่อยๆ ปรับขึ้นจนถึง สภาวะอยู่ตัว จากผลการทคสอบแสคงให้เห็นถึงผลการตอบสนองระหว่างกระแสกับแรงคันของ วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เซื้อเพลิง

## 4. จำลองพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 วัตต์

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการยืนยันความถูกต้องของวงจรต้นแบบ โดยการจำลองการทำงาน เซลล์เชื้อเพลิงขนาค 500 วัตต์ ที่ระดับแรงดันประมาณ 30 โวลต์ดังภาพที่ 106 ซึ่งได้พัฒนาโดย ห้องปฏิบัติการเซลล์เชื้อเพลิง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ให้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยนี้ โดย ลักษณะฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 107



ภาพที่ 106 เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 วัตต์



ภาพที่ 107 ลักษณะฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิงขนาค 500 วัตต์

สำหรับการทคลองจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จะจำกัดกระแสประมาณ 15 แอมป์ โดยฐานข้อมูลที่ได้จะนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรงที่มีก่าใกล้เกียงชุดข้อมูลในแต่ละจุดซึ่ง จะแบ่งเป็น 2 ช่วงกือ ก่ากวามสูญเสียการกระตุ้นและก่ากวามสูญเสียจากกวามต้านทานของเซลล์ เชื้อเพลิง โดยแสดงดังภาพที่ 108





โดยที่ A = แรงดันช่วงการสูญเสียการกระตุ้น B = แรงดันช่วงการสูญเสียจากความต้านทานภายใน

เมื่อได้ก่าของสมการเส้นตรงแล้วจากนั้นจะนำมากำหนดการควบคุมให้กับวงจรเลียนแบบ พฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อจำลองการทำงานทางด้านกระแสและแรงดัน โดยจะทดลองทำการ ทดสอบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Matlab Simulink ดังภาพที่ 109 แล้วนำผลที่ได้ทำ การเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิงดังภาพที่ 110 รวมถึงก่าความกลาดเกลื่อนที่เกิดขึ้นดัง ภาพที่ 111 เพื่อยืนยันความถูกต้องก่อนที่จะทำการทดสอบจริงด้วยวงจรต้นแบบ



ภาพที่ 109 ผลการจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิง 500 วัตต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 110 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองบนกอมพิวเตอร์กับฐานข้อมูล เซลล์เชื้อเพลิงขนาค 500 วัตต์



## ภาพที่ 111 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 วัตต์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากผลการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Matlab Simulink แสดงให้เห็นว่าสมการ เส้นตรงที่ใช้ในการออกแบบสำหรับควบคุมวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถ นำมาใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนที่ก่อนข้างต่ำ ในการทดลองจริงของ วงจรต้นแบบจะทดสอบที่สภาวะการทำงานต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้ชุดโหลดความ ต้านทานวัตต์สูงทำการเปลี่ยนก่าความต้านทานเพื่อให้กระแสภายในระบบมีก่าเพิ่มขึ้น จากนั้นทำ การวัดก่าของแรงคันซึ่งจะใช้ Differential Probe ของบริษัท Tektronix ซึ่งจะเป็นการวัดแบบแยก กราวด์ช่วยให้การวัดสัญญาณที่ได้นั้นไม่มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น ส่วนทางด้านกระแสจะวัดจาก สัญญาณจากเซนเซอร์เนื่องจากขาดอุปกรณ์สำหรับวัดกระแสสำหรับออสซิลโลสโคป โดยสามารถ วัดเปรียบเทียบระหว่างกระแสและแรงคันได้ ผลการทดลองจะแสดงดังภาพที่ 112 ถึง117



**ภาพที่ 112** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดจาก 26.7 โอห์มเป็น 14 โอห์ม



**ภาพที่ 113** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดจาก 7 โอห์มเป็น 4 โอห์ม



ภาพที่ 114 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 3.2 โอห์ม



ภาพที่ 115 แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 2.5 โอห์ม



**ภาพที่ 116** แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 1.3 โอห์ม



ภาพที่ 117 แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 1.2 โอห์ม

จากผลการทคลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงสามารถ จำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงขนาค 500 วัตต์ ตามลักษณะฐานข้อมูล โคยทำการทคสอบทุกๆ สภาวะของการเปลี่ยนแปลงของโหลดและพฤติกรรมทางพลวัต

#### วิจารณ์

จากผลการทดลองวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นโดย ทดสอบที่สภาวะของโหลดในระดับต่างๆ เพื่อแสดงสถานะการทำงานที่บริเวณก่ากวามสูญเสีย ภายในของเซลล์เชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่าสามารถจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วง บริเวณกวามสูญเสียได้ ผลที่ได้จะนำมาวิเกราะห์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจาก เครื่องต้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิงจริง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 118 ถึง 122



ภาพที่ 118 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการทคลองวงจรด้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิง ที่อัตราการ ไหลเชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์





ภาพที่ 120 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการทคลองวงจรด้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิง ที่อัตราการ ใหลเชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์



## ภาพที่ 122 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการทคลองวงจรต้นแบบกับฐานข้อมูล เซลล์เชื้อเพลิงขนาค 500 วัตต์

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทคลองระบบต้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์ เชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่าสามารถจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลจริง ทั้งลักษณะกระแสและแรงคัน โดยที่ค่าความกลาดเกลื่อนที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 123 ถึง 127



ภาพที่ 123 ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหล เชื้อเพลิง 25 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 124 ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใหล เชื้อเพลิง 50 เปอร์เซ็นต์



**ภาพที่ 125** ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหล เชื้อเพลิง 75 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 126 ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหล เชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 127 ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับ เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 วัตต์

เมื่อพิจารณาการจำลองบริเวณความสูญเสียการกระตุ้นจะเห็นว่ามีค่าของระดับแรงดันที่ ก่ากระแสต่างๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิง แต่เมื่อทำการจำลองบริเวณความ สูญเสียจากความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจะเห็นว่าเมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่าของแรงดันที่ ได้จะเริ่มมีความเบี่ยงเบนจากค่าฐานข้อมูลจริงมากขึ้น ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุจาก หลายๆ ส่วนด้วยกันเช่น ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ซึ่งประกอบไปด้วย ไอจีบีที ไดโอด ค่าความด้านทานแฝงในตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น ส่วนสาเหตุถัดมาจะมาจากวงจรเรียง กระแสสามเฟสซึ่งเมื่อทำการวัดระดับค่าแรงดันในขณะที่กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นระดับแรงดันจะมีค่า ลดลง สาเหตุดังกล่าวที่เกิดขึ้นส่งผลให้การกำหนดค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตซ์ในวงจรบัคคอน เวอร์เตอร์ไม่สามารถปรับแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้มีขนาดแรงดันที่สอดกล้องกับค่าวัฏจักรการ ทำงานได้

ดังนั้นในการแก้ไขปัญหาดังที่ได้กล่าวมาแล้วผู้วิจัยได้เสนอเพิ่มในส่วนของตัวอุปกรณ์ ตรวจวัดระดับแรงคันทางด้านวงจรเรียงกระแสสามเฟสดังภาพที่ 128 เพื่อทำการกำหนดก่าอ้างอิง ให้สามารถแปรผันตามก่าแรงคันที่เปลี่ยนไปซึ่งจะส่งไปยังไมโกรกอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล และทำการสร้างสัญญาณ PWM ที่มีการชดเชยแรงคันที่สูญเสียไป โดยทำการเพิ่มในส่วนของการ โปรแกรมเพื่อตรวจสอบก่าแรงคันแรงคันอ้างอิงคังภาพที่ 129



ภาพที่ 128 อุปกรณ์ตรวจจับแรงคันอินพุตเพิ่มเติมสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง



ภาพที่ 129 แผนผังการชคเชยแรงคัน

จากแผนผังการทำงานของโปรแกรมจะเห็นว่าได้เพิ่มส่วนของการตรวจสอบแรงดัน เอาต์พุตว่ามีขนาดที่น้อยกว่าค่าที่ต้องการหรือไม่ซึ่งถ้ามีค่าที่น้อยกว่า โปรแกรมจะทำการคำนวณค่า การชดเชยแรงดันซึ่งจะมีถักษณะดังสมการที่ 45 เพื่อนำไปกำหนดก่าการคำนวณแบบเชิงเส้นเพิ่ม เข้าไปทำให้ก่าวัฏจักรการทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีระดับแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรบัคคอน-เวอร์เตอร์มีก่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

$$\overline{\mathbf{y}}_{\rm com} = \overline{\mathbf{y}} + \mathbf{V}_{\rm com} \tag{45}$$

โดยที่ y<sub>com</sub> = ค่าของข้อมูลที่ได้จากสมการเชิงเส้นที่มีการชดเชยข้อมูลแล้ว y = ค่าของข้อมูลที่ได้จากสมการเชิงเส้นได้จากสมการ a + bx V<sub>com</sub> = ค่าของส่วนต่างระหว่างแรงคันอ้างอิงและแรงคันเอาต์พุต

จากการแก้ไขดังกล่าวได้นำมาทำการทดลองอีกครั้งโดยจะทำการจำลองกับเซลล์เชื้อเพลิง ขนาด 500 วัตต์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะแสดงดังภาพที่ 130 ถึง 136



**ภาพที่ 130** แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดจาก 25 โอห์มเป็น 14.4 โอห์ม



ภาพที่ 131 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดจาก 7.1 โอห์มเป็น 3.8 โอห์ม



ภาพที่ 132 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดจาก 6.1 โอห์มเป็น 3.1 โอห์ม



ภาพที่ 133 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 2.5 โอห์ม



**ภาพที่ 134** แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 2.2 โอห์ม



ภาพที่ 135 แรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 1.9 โอห์ม



ภาพที่ 136 แรงคันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลดเป็น 1.5 โอห์ม

ทำการเปรียบเทียบผลการทคลองที่ได้กับฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิงขนาค 500 วัตต์ ดังภาพที่ 137 และทำการหาค่าความคลาคเคลื่อนที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 138 เมื่อได้ทำการแก้ไขในส่วนที่ บกพร่อง



ภาพที่ 137 ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการทคลองวงจรด้นแบบกับฐานข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิง งนาค 500 วัตต์ ที่ได้ทำการชดเชยแรงคัน



ภาพที่ 138 ค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับ เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 วัตต์ ที่ได้ทำการชดเชยแรงดัน

จากผลการทดลองและเปรียบเทียบผลเมื่อได้ทำการแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวจะเห็นได้ว่า สามารถเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงได้ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลเซลล์ชื้อเพลิงโดยมีค่า กวามกลาดเกลื่อนที่น้อยมาก ดังนั้นวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้สร้างขึ้นสามารถ นำไปใช้ในการทดสอบได้จริงและมีการตอบสนองที่สภาวะโหลดได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ถือได้ว่า เป็นจุดเริ่มต้นเพื่อเป็นแนวการสร้างตัวจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ งานได้จริงในทางปฏิบัติ

#### สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องเช่น โครงสร้างการทำงาน เซลล์เชื้อเพลิงและวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างวงจร เลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานได้จริงให้สามารถนำไปประยุกต์กับการออกแบบ ร่วมกับระบบควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขายอยู่ในปัจจุบันนั้นยัง มีราคาแพงอยู่มากดังนั้นการนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้งานจริงเพื่อทคสอบระบบจึงเป็นเรื่องยาก วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงจึงช่วยลดปัจจัยทางด้านนี้ หัวข้อสรุปของงานวิจัยมี ดังต่อไปนี้

 ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่ออกแบบด้วยวงจร อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบบัคคอนเวอร์เตอร์และใช้วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟสต่อแบบเคลต้าง่าย แรงดันไฟตรงให้กับระบบ

 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์จะใช้วงจรควบคุมเข้ามาช่วยในการประมวลผล รับ ค่ากระแสและแรงคัน แสดงสถานะการทำงานของวงจรและควบคุมกระบวนการทั้งหมด

 การควบคุมวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงใช้หลักการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักร การทำงาน (Duty Cycle) ด้วยค่าของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

 รงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้สามารถเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิง ได้ตั้งแต่แรงดัน 10-70 โวลต์และกระแสไม่เกิน 15 แอมป์ ในการทดลองสามารถทดลองที่กำลังงาน สูงสุดที่ 600 วัตต์

 ร. วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้มีความยืดหยุ่นในการเลียนแบบ เซลล์เชื้อเพลิงในช่วงการทำงานที่กว้างทั้งกระแสและแรงคันรวมไปถึงอัตราการไหลของเชื้อเพลิง และพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิง  เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการออกแบบวงจรและ โปรแกรมที่นำเสนอ วงจรต้นแบบ ได้ถูกสร้างขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรต้นแบบสามารถเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่าง ถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานจริงได้

#### ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้นำเสนอไปนี้มีพิกัดของขนาด กระแสและแรงคันที่จำกัดสำหรับเลียนแบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง คังนั้นเพื่อเพิ่มพิกัดของ ขนาดกระแสและแรงคัน ควรมีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงทางด้ำอินพุตของวงจรบัคกอนเวอร์เตอร์ที่ สามารถปรับขนาดแรงคันไฟได้และมีขนาดกระแสที่สูง เช่น วงจรบักเร็กติไฟเออร์หรือวงจร แหล่งจ่ายกระแส (Current Source) แบบไฟตรง เป็นต้น

### เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ถิรพัฒน์ วิลัยทอง. 2549. การทำโครงงานวิจัยของเยาวชนความคาดหวังของนักวิจัยอาวุโส. โครงการพัฒนาอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับเด็กและเยาวชน. แหล่งที่มา: http://www.nstda.or.th/hrd/jstp/activity/longcamp/2549, 20 ตุลาคม 2551.

ธนารัฐ สิงหา. 2545. เซลล์เชื้อเพลิงกับการนำไปใช้งาน. **วารสารโลกพลังงาน** 5 (16): 56-62.

- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวคล้อม. 2551. <mark>เครื่องกำเนิดพลังงานโดยเซลล์เชื้อเพลิง</mark>. มูลนิธิพลังงาน เพื่อสิ่งแวคล้อม. แหล่งที่มา: http://www.efe.or.th, 10 มกราคม 2552.
- วีระเชษฐ์ ขันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2547. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.** ครั้งที่ 4. ห้างหุ้นส่วน จำกัด วี.เจ. พริ้นติ้ง, 162 หมู่ 4 ถนนราษฎร์พัฒนา แขวงบางประกอก เขตราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ 10140.
- สมนึก บุญพาใสว. 2548. **การใช้เซลล์เชื้อเพลิงในคตวรรษที่ 21**. สถาบันส่งเสริมการ สอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. แหล่งที่มา:http://www.ipst.ac.th/design, 27 มีนาคม 2549.
- Famouri, P. and R.S. Gemmen. 2003. Electrochemical circuit model of a PEM fuel cell, pp. 1436-1440. IEEE Proceedings on Power Engineering Conference.
- Garnier, J., M.C. Pera, D. Hissel, F. Harel, D. Candusso, N. Glandut, J.P. Diard,
  A. De Bernardinis, J.M. Kauffmann and G. Coquery. 2003. Dynamic PEM Fuel Cell
  Modeling for Automotive Application, pp. 3284-3288. IEEE Proceedings on
  Vehicular Technology Conference.
- Larminie, J. and A. Dicks. 2003. **Fuel Cell Systems Explained**. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, New York.

Sadli, I., P. Thounthong, J.P. Matin, S. Rael and B. Davat. 2004. Behaviour of a PEMFC Supplying a Low Voltage Static Converter. National Research Council of Thailand (NRCT). Available Source: http://www.energy-based.nrct.go.th, November 27, 2008.

Yuvarajan, S. and Dachuan Yu. 2004. Characteristics and modeling of PEM fuelCells, pp. 880–883. **IEEE Proceeding on Circuits and Systems Conference.** 

# ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายมนูญ บูลย์ประมุข
วัน เดือน ปี ที่เกิด	5 พฤศจิกายน 2520
สถานที่เกิด	จังหวัดตาก
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีไฟฟ้า) สถาบันราชภัฏกำแพงเพชร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-